



Aalto-yliopisto
Insinöörیتieteiden
korkeakoulu

Mikko Koivumäki

Voimalaitoksen hiilimyllyjen ja niiden vaihteistojen uusimisen teknistaloudellinen vertailu

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 21.11.2017

Valvoja: Professori Juhani Orkas

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Antti Saikkonen

Tekijä Mikko Koivumäki

Työn nimi Voimalaitoksen hiilimyllyjen ja niiden vaihteistojen uusimisen teknistaloudellinen vertailu

Maisteriohjelma Master's Programme in Mechanical Engineering

Koodi ENG25

Työn valvoja Professori Juhani Orkas

Työn ohjaaja Diplomi-insinööri Antti Saikkonen

Päivämäärä 21.11.2017

Sivumäärä 91 + 8

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Tämä diplomityö tehtiin Helen Oy:lle, joka on Helsingin seudun pääasiallinen energiayhtiö. Työn tavoitteena oli tuottaa esitys teknistaloudellisesti järkevimmästä toteutustavasta Salmisaaren B-voimalaitoksen hiilimyllyjen vaihteistojen korjaamisen, uusimiseen tai vaihtoehtoisesti uusien hiilimyllyjen hankkimisesta. Tutkimuksessa otettiin huomioon myös Helen Oy:n pitkän tähtäimen suunnitelmat sekä strategiset tavoitteet.

Teknistaloudellinen tutkimus sisältää neljä osa-aluetta: design, simulointi, riskien arviointi ja kannattavuuslaskenta. Tutkimuksen teknisessä tarkastelussa käytettiin lähteinä asiantuntijoiden lausuntoja, voimalaitoksen häiriöraportteja ja NDT-tarkastusraportteja. Lisäksi vaihteistokotelon designia ja vaurioita tarkasteltiin valuteknisestä näkökulmasta asiantuntijan avustuksella sekä CAD-malliin pohjautuvalla valusimulaatiolla. Hiilimyllyjen modernisoinnin riskejä arvioitiin asiantuntijoiden lausuntoihin pohjautuen talouden, käytettävyyden ja turvallisuuden näkökulmista. Taloudellisessa tarkastelussa hiilimylly-, vaihteisto- ja vaihteistokoteloinvestointien kannattavuutta tarkasteltiin investointilaskelmien sekä herkkyysanalyysin avulla. Lisäksi hitsatun ja valetun vaihteistokotelon kustannuksia tarkasteltiin ja koteloiden uusimiselle määritettiin kannattavuusraja. Taloudellisissa tarkasteluissa käytettiin Helen Oy:n kannattavuuslaskentamallia yrityksen asettamilla lähtöarvoilla. Laskelmissa käytetyt kustannukset saatiin hiilimylly- ja vaihteistotoimittajilta sekä Helen Oy:n tietokannoista.

Riskien arviointi suoritettiin ainoastaan hiilimyllyjen osalta, jonka tulokset osoittivat, ettei uusien hiilimyllyjen hankkiminen ole kannattavaa. Hiilimyllyt ovat teknisesti hyvässä kunnossa eikä niitä ole kannattavaa modernisoida taloudellisestakaan näkökulmasta. Vaihteistot ovat teknisesti hyvässä kunnossa segmenttilaakereita ja vaihteistokoteloja lukuun ottamatta. Vaihteistojen ja vaihteistokoteloiden taloudellinen tarkastelu osoitti, ettei uusien vaihteistojen tai vaihteistokoteloiden hankkiminen ole taloudellisesti kannattavaa.

Tutkimuksen tuloksena voidaan sanoa, että uusien hiilimyllyjen, vaihteistojen sekä vaihteistokoteloiden hankkiminen ei ole kannattavaa. Sen sijaan vaihteistojen segmenttilaakerien liukupinnat tulee uusua tulevaisuudessa huollettavissa vaihteistoissa ruiskuttamalla valkometalli segmenttilaakerien liukupintoihin perinteisen valamisen sijaan. Lisäksi liukupintoihin tulee koneistaa voiteluöljytaskut segmenttilaakerien kuivuudesta aiheutuneiden vaurioiden ehkäisemiseksi. Vaihteistokotelot tulee korjata tulevaisuudessa tehtävien huoltojen yhteydessä kylmiä korjausmenetelmiä käyttämällä. Mikäli vaihteistokoteloiden korjaukseen kohdistuvat kustannukset kasvavat yli 70 %:a tai kotelot vaurioituvat pahasti, täytyy uusien vaihteistokoteloiden hankkimista harkita uudestaan.

Avainsanat teknistaloudellinen vertailu, hiilimylly, vaihteisto, kannattavuuslaskelma, valusimulaatio

Author Mikko Koivumäki

Title of thesis Techno-economic comparison for renewal of coal pulverizers and their gearboxes in power plants

Master programme Master's Programme in Mechanical Engineering

Code ENG25

Thesis supervisor Professor Juhani Orkas

Thesis advisor Antti Saikkonen M.Sc. (Tech.)

Date 21.11.2017

Number of pages 91 + 8

Language Finnish

Abstract

This thesis was carried out for Helen Ltd which is the capital energy company of Helsinki City in Finland. The goal of this thesis was to present the most techno-economically reasonable way to execute a comparison between possible alternatives for repairing gearboxes of Salmisaari B power plant's coal pulverizer, acquiring new gearboxes or new coal pulverizer. Furthermore, the research accounted for long-term planning and strategic goals of Helen Ltd as well.

The techno-economic research includes four parts: design, simulation, risk analysis and cost accounting. In the technical examination of the thesis, statements of experts, fault reports of the power plant, and non-destructive testing reports were used as sources. In addition, the design of the coal pulverizer's gearbox and its damages were examined based on expert statements and by using a cast simulation of the gearbox's CAD model. The risk analysis of the coal pulverizers' renewal was carried out in co-operation with experts. Divisions of the risk analysis were economy, usability and safety. In the economical examination of the thesis, the profitability of investments was examined by investment calculations and sensitivity analyses of the coal pulverizers and the gearboxes. In addition, costs of welded and casted structures of the current gearboxes were examined and the break-even point for their renewal was defined. The cost accounting model of Helen Ltd was used in the economical examination with company's own initial values. The costs utilized in calculations were obtained from databases of Helen Ltd and from suppliers of coal pulverizers and gearboxes.

The risk analysis was executed only for the renewal of coal pulverizers, the results of which showed that acquiring new coal pulverizers is not profitable. The current coal pulverizers are in good condition and the renewal is not profitable from the economical point of view either. The current gearboxes are technically in good condition except for segment bearings and the casting of the gearbox. The economical examination of the gearboxes showed that their renewal is not profitable.

The result of this thesis show that, the renewal of the coal pulverizers, the gearboxes or the castings of the current gearboxes is not profitable. Instead of renewing the above equipment, the runners of the segment bearings need to be replaced by sprayed coatings, and the lubricant pockets need to be machined in the runners. The procedures will help to prevent bearing failures. The castings of the gearboxes need to be repaired in future overhauls by using the cold repairing methods. If the repairing costs increase by more than 70 % or the castings become damaged, acquiring new castings needs to be considered.

Keywords techno-economic comparison, coal pulverizer, gearbox, cost accounting, casting simulation

Alkusanat

Tämä diplomityö toteutettiin Helen Oy:n toimeksiannosta. Aiheeseen päädyttiin hiilimyllyissä ja niiden vaihteistoissa ilmenneiden ongelmien vuoksi. Lisäksi diplomityön tarkoituksena oli selkeyttää askelmerkkejä kohti Helen Oy:n ilmastoneutraalia tavoitetta hiilimyllyjen osalta. Aihe oli ajankohtainen ja haastava, joka inspiroi minua erittäin paljon.

Diplomityön valvojana toimi professori Juhani Orkas Aalto-yliopiston Konetekniikan laitokselta. Haluan erityisesti kiittää professori Juhani Orkasta asiantuntevasta ja sujuvasta valvonnasta koko diplomityöprosessin aikana. Haluan myös kiittää suuresti tohtorikoulutettavaa Kalle Jalavaa, jonka ansiosta vaihteistokotelon valusimulaatio ja valutekninen tarkastelu olivat mahdollisia.

Haluan kiittää tämän diplomityön mahdollistaneita henkilöitä Helen Oy:ltä. Ensisijaisesti haluan kiittää ohjaajaani diplomi-insinööri Antti Saikkosta onnistuneesta ja antaumuksellisesta ohjauksesta. Todella suuri kiitos kuuluu myös kunnonhallintapäällikölle Kaj Luukolle diplomityön ohjaamisen asiantuntevasta tukemisesta. Haluan myös kiittää esimiestäni Tapio Luostarista erinomaisesta esimiestyöstä ja saamastani mahdollisuudesta tehdä diplomityö näin mielenkiintoisesta aiheesta. Lisäksi haluan kiittää Esa Koskista ja Juhani Stoltia sekä muuta Helen Oy:n henkilöstöä antamistaan haastatteluista sekä tuesta diplomityön eri vaiheissa.

Viimeiseksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni saamastani kannustuksesta sekä tuesta koko opiskeluajan ja tämän diplomityöprosessin aikana. Kaikkein suurimmat kiitokset ansaitsevat kuitenkin vanhempani, jotka ovat aina uskoneet minuun ja mahdollistaneet opiskeluni sekä tukeneet minua elämän myötä- ja vastoinkäymisissä.

Espoo 21.11.2017

Mikko Koivumäki

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	1
Merkinnät ja lyhenteet	3
1 Johdanto	4
1.1 Tutkimuksen tausta	4
1.2 Työn tavoitteet	4
1.3 Työn rajaus ja rakenne	5
1.4 Yritysesittely	5
1.5 Teknistoloudellinen vertailu ja tutkimusmenetelmät	6
2 Salmisaaren B-voimalaitos	7
2.1 Voimalaitosprosessi ja seospoltto	7
2.2 Polttoaineet	9
2.3 Polttoaineiden käsittely ja varastointi	11
2.3.1 Kivihiilen käsittely ja varastointi	11
2.3.2 Puupellettien käsittely ja varastointi	13
3 Polttoaineiden jauhautuvuus ja jauhatusmenetelmät	15
3.1 Jauhatusmenetelmät	18
3.1.1 Kuularengasmylly	18
3.1.2 Valssimylly	20
4 Jauhatuksessa käytettävät vaihteistot	22
4.1 Vaihteiston valinta	22
4.2 Hammasvaihdeyyppit	22
4.3 Moniportaiset vaihteistot	27
4.4 Laakerointi	29
4.5 Vaihteistojen voitelu	30
4.6 Kunnonvalvonta	32
5 Vaihteistokotelot	34
5.1 Kotelon merkitys ja tehtävä hammasvaihteessa	34
5.2 Valaminen valmistusmenetelmänä	34
5.3 Hitsaaminen valmistusmenetelmänä	38
5.4 Vaihteistokotelon suunnittelu ja valmistus	41
5.5 Vaihteistokoteloiden korjausmenetelmät	44
6 Salmisaari B-voimalaitoksen hiilimyllyt ja vaihteistot	47
6.1 Käytön ongelmat	47
6.2 Kunnossapito	49
6.3 Kunnonvalvonta	51
6.4 Hiilimyllyjen ja vaihteistojen kunto	52
6.5 Vaurioiden korjaaminen	58
6.6 Vaihteistokotelon valutekninen tarkastelu	59
7 Riskienhallinta ja arviointi	63
7.1 Riskien arviointi	64
8 Investoinnin kannattavuus	66
8.1 Investointilaskelma ja herkkyyssanalyysi	66
8.2 Hiilimyllyjen investointi	68

8.3	Vaihteistojen investointi.....	72
8.4	Vaihteistokoteloiden investointi.....	76
9	Tulosten tarkastelu ja pohdinta	79
9.1	Riskit	79
9.2	Investoinnin kannattavuus.....	79
9.3	Johtopäätökset.....	80
9.4	Jatkotutkimusehdotukset.....	81
10	Yhteenveto	83
	Lähdeluettelo	85
	Liiteluettelo	92
	Liitteet	

Merkinnät ja lyhenteet

Merkinnät

\dot{m}	[t/h]	syöttökapasiteetti
ω	[rad/s]	kulmanopeus

Lyhenteet

2D	Kaksiulotteinen
3D	Kolmiulotteinen
CAD	Computer-aided Design, tietokoneavusteinen suunnittelu
CO ₂	Hiilidioksidi
D-pää	Drive end, sähkömoottorin käyttöakselin puoleinen pääty
EU	Euroopan unioni
FEM	Finite element method, elementtimenetelmä
FFT	Fast Fourier transform, nopea Fourier'n muunnos
HGI	Hardgrove grindability index, Hardgroven murskattavuusindeksi
K1	Salmisaaren B-voimalaitoksen pääkattila
MIG	Metal inert gas welding, kaasukaarihitsausmenetelmä
MAG	Metal active gas welding, kaasukaarihitsausmenetelmä
NDT	Nondestructive testing, rikkomaton aineenkoetus
NO _x	Typen oksidit
N-pää	Non-drive end, sähkömoottorin takapääty.
OES	Optinen emissiospektrometri
PTS	Pitkän tähtäimen suunnitelma
ROI	Return of investment, sijoitetun pääoman tuottoprosentti
SaA	Salmisaaren A-voimalaitos
SaB	Salmisaaren B-voimalaitos
TIG	Tungsten inert gas arc welding, kaasukaarihitsausprosessi
TTBGI	Thermally treated biomass grindability index, biomassan jauhautuvuutta kuvaava indeksi
YAG	Yttrium-Aluminium-Garnet

1 Johdanto

Helen Oy modernisoi jatkuvasti voimalaitoksiaan sekä lämpö- ja jäähdytyskeskuksiaan, ja on asettanut tavoitteekseen olla ilmastoneutraali vuoteen 2050 mennessä. Pelletin seospoltto aloitettiin Salmisaareissa vuonna 2014, nykyinen laitteisto mahdollistaa jopa 5–7 %:n pellet-tiosuuden polttoainetehosta kivihiilen joukossa.

Tässä työssä tutkitaan hiilimyllyjen ja niiden vaihteistojen käytönaikaisia ongelmia ja vaihteistojen vikaantumisia kunnossapidon sekä kunnonvalvonnan näkökulmasta. Hiilimyllyjen ja vaihteistojen kuntoa tarkastellaan asiantuntijoiden lausuntojen, NDT-tarkastusraporttien ja käyttötuntien sekä kunnossapitokustannusten perusteella. Lisäksi kartoitetaan vaihteistojen korjausmahdollisuuksia, ja tutkitaan vaihteistokoteloita valuteknisestä näkökulmasta. Uusien hiilimyllyjen ja vaihteistojen sekä vaihteistokoteloiden investoinnin kannattavuutta tutkitaan investointilaskelmien ja herkkyysanalyysien avulla. Lisäksi tarkastellaan hiilimyllyjen modernisoinnin vaikutukset omaisuuden riskienhallintaan. Työssä pyritään löytämään teknistaloudellisesti järkevin ratkaisu vaihteistojen korjaamiselle tai uusinnalle tai vaihtoehtoisesti uusien hiilimyllyjen hankkimista varten.

1.1 Tutkimuksen tausta

Vuonna 1984 rakennetussa Salmisaaren B-voimalaitoksessa on neljä kappaletta kivihiilen jauhamiseen tarkoitettuja kuularengasmyllyjä, jotka ovat kaikki alkuperäisiä. Hiilimyllyjen vaihteistojen koteloissa on havaittu säröjä ja öljyvuotoja. Lisäksi vaihteistojen painelaakeroinnissa on havaittu ongelmia, sillä segmenttilaakerit vaurioituvat helposti. Vaihteistoja on viisi kappaletta ja niitä kierrätetään tarpeen mukaan. Yhtenä juurisyynä vaihteistokoteloiden säröjen muodostumiselle on pidetty epätasaisia vaihteistokoteloiden perustuksia. Salmisaari B-voimalaitoksen hiilimyllyt tulisi tämän hetkisen PTS:n mukaan uusiksi ajanjaksolla 2024–2027.

1.2 Työn tavoitteet

Työn tavoitteena on tuottaa esitys teknistaloudellisesti järkevimmästä toteutustavasta hiilimyllyjen vaihteistojen korjaamisen, uusimiseen tai vaihtoehtoisesti uusien hiilimyllyjen hankkimisesta. Esitys pitää sisällään riskien arvioinnin ja investointilaskelmat sekä herkkyysanalyysit. Esityksessä otetaan myös huomioon voimalaitoksen pitkän tähtäimen suunnitelmat sekä Helenin strategiset tavoitteet.

Työssä määritetään tämän hetkinen hiilimyllyjen ja vaihteistojen kunto, sekä tarkastellaan niihin liittyviä vikaantumisia. Tutkimuksessa käydään läpi hiilimyllyjen ja vaihteistojen kunnossapitoa, asiantuntijoiden lausuntoja, häiriö- ja tarkastusraportteja, sekä tarkastellaan hiilimyllyjen käyttötunteja ja niihin kohdistuneita kustannuksia. Vaihteistokoteloiden vikaantumisien juurisyiden etsimisessä käytetään apuna kotelon valuteknistä tarkastelua sekä vaihteistopedille suoritettua kunnonvalvontaa. Tutkimusongelma voidaan esittää seuraavien kysymysten muodossa:

- Missä kunnossa hiilimyllyt ja vaihteistot ovat ja kuinka kauan niiden uskotaan kestävän ilman kunnossapidon merkittävää lisäämistä?
- Mitkä ovat merkittävimmät juurisyynä vaihteisto-ongelmien aiheutumisessa?
- Kuinka vaihteistoissa ilmenneitä vaurioita voidaan korjata ja ehkäistä?

- Onko uusien hiilimyllyjen, vaihteistojen tai vaihteistokoteloiden hankkiminen taloudellisesti kannattavaa, ja minkälainen vaikutus investoinneilla on voimalaitoksen käytettävyyden riskitasoon?

1.3 Työn raja- ja rakenne

Tässä diplomityössä keskitytään käsittelemään Salmisaari B-voimalaitoksen hiilimyllyjä ja niiden vaihteistoja. Työ ei ota kantaa mahdollisesti muuttuviin pellettien seososuuksiin eikä työssä käsitellä polttoaineen palamista. Tämä diplomityö keskittyy hiilimyllyjen sekä niiden vaihteistojen ja vaihteistokotelorakenteiden vertailuun. Työssä käydään läpi eri vaihteistokoteloiden valmistus- ja korjausmenetelmät. Vaihteistokoteloja tarkastellaan valuteknisestä näkökulmasta, mutta työ ei ota kantaa materiaalitieteeseen tarkasteluun. Työ pitää sisällään riskien arvioinnin ja investointilaskelmat sekä herkkyyksianalyysit hiilimyllyjen, vaihteistojen ja vaihteistokoteloiden modernisoinnista.

Työ on jaettu johdannon jälkeen yhdeksään lukuun. Johdantoluvussa esitellään myös hieman Helenin toimintaa ja strategisia tavoitteita sekä kuvataan teknistaloudellisen vertailun periaatetta. Luvussa 2 käydään läpi Salmisaaren B-voimalaitoksen tuotantoprosessia, käytettäviä polttoaineita ja niiden käsittelyä sekä varastointia. Luvussa 3 käsitellään polttoaineen jauhautuvuutta sekä jauhausmenetelmiä. Luvussa 4 syvennytään vaihteistojen toimintaan ja kunnonvalvontaan. Luvussa 5 tarkastellaan vaihteistokotelon merkitystä hammasvaihteessa, ja syvennytään koteloiden valmistukseen ja suunnitteluun sekä korjausmenetelmiin.

Luvussa 6 käsitellään hiilimyllyjen ja vaihteistojen käytönaikaisia ongelmia, kunnossapitoa sekä kunnonvalvontaa. Lisäksi tutkitaan edellä mainittujen laitteiden kuntoa, vikaantumisia ja vaurioiden korjausmahdollisuuksia, sekä vaihteistokoteloille suoritetaan valutekninen tarkastelu. Luvussa 7 käsitellään omaisuuden riskienhallintaa ja arvioidaan hiilimyllyjen modernisoinnin vaikutusta riskitasoihin. Luvussa 8 lasketaan hiilimyllyjen, vaihteistojen sekä vaihteistokoteloiden investoinnin kannattavuutta investointilaskelmien ja herkkyyksianalyysien avulla. Lisäksi määritetään kannattavuusraja, joka määrittää kumpi vaihteistokoteloiden valmistusmenetelmistä on kannattavampi. Luvussa 9 tarkastellaan luvuissa 7 ja 8 saatuja tuloksia sekä tehdään johtopäätöksiä tutkimuksesta. Lisäksi esitetään jatkotoimenpiteitä vaativat tutkimusaiheet. Diplomityö päättyy lukuun 10, jossa esitetään yhteenveto tutkimuksesta.

1.4 Yritysesittely

Helen Oy on Helsingin seudun päätoiminen energiayhtiö, jolla on noin 400 000 asiakasta eri puolilla Suomea. Yrityksen kaukolämmöntuotanto kattaa yli 90 % Helsingin lämmitystarpeesta. Helen Oy tuottaa kaukolämpöä ja sähköä yhteistuotannolla voimalaitoksissaan Vuosaarella, Hanasaarella ja Salmisaarella. Voimalaitosten pääpolttoaineina ovat maakaasu ja kivihiili, jonka lisäksi poltetaan pellettiä kivihiilen joukossa Hanasaaren ja Salmisaaren voimalaitoksilla. Helen Oy tuottaa sähköä yhteistuotannon lisäksi myös aurinkosähköä Kivikon ja Suvilahden aurinkovoimaloissa. Yrityksen tuotantoon kuuluu eri osakkuusyhtiöiden välityksellä hankittua vesi-, tuuli- ja ydinvoimaa. (Helen Oy, 2017e.)

Kylmällä säällä riittämättömän yhteistuotantolaitosten kaukolämmön tuottoa tukemaan käynnistetään lämmön erillistuotanto eli lämpökeskukset. Lämpökeskusten ylös- ja alasajoajat ovat lyhyitä, sekä niiden käyttötunnit ovat alhaisia vuositasolla. Lämpökeskuksia käytetään turvaamaan lämmönsaantia myös poikkeustilanteissa, jos voimalaitoksilla tai kaukolämpöverkostossa ilmenee ongelmia. (Helen Oy, 2017e.)

Helsingin kaupungin asukkaiden lämmön kulutus vaihtelee päivän mittaan kellonajasta riippuen. Selvästikin päivällä kaukolämpöä tarvitaan enemmän kuin yöllä, joten kaukolämmön tuotantoa täytyy tasata. Tähän tarkoitukseen käytetään lämpöakkuja. Lämpöakut ovat suuri-kokoisia vesisäiliöitä, joihin varastoidaan yöaikaan tuotettua lämpöä voimalaitoksilta. Kun lämpöä tarvitaan päiväsaikaan, se puretaan akuista. (Helen Oy, 2017e.)

Helen Oy toimittaa myös kaukojäähdytystä yksityis- ja yritysasiakkaille Helsingin seudulla. Kaukojäähdytys jäähdyttää asunnon tai toimitilan tilalaitteen avulla, johon tuodaan kylmää vettä jäähdytysverkosta. Huoneiston ilma lämmittää tilalaitteessa olevan jäähdytysveden, joka lämmitettyään johdetaan takaisin jäähdytysverkoston paluuputkeen. Kiinteistöistä talteen kerätty lämpöenergia ohjataan Katri Valan lämpöpumppulaitokselle Helsingin Sörnäisiin, jossa lämpöpumppulaitos tuottaa uusiutuvaa kaukolämpöä ja -jäähdytystä puhdistetusta jätevedestä sekä kaukojäähdytyksen paluuvdestä. Jäähdytyksen tuottamiseen käytetään hukkaan meneviä energiavirtoja, kuten talvisin kylmää merivettä. (Helen Oy, 2017b.)

Helenin energiantuotannon hiilidioksidipäästöt ovat noin 3 miljoonaa tonnia vuositasolla. Päästöjen vähentämiseksi Helen panostaa jatkuvasti uusiutuvien energialähteiden käytön kehittämiseen. Helenin tavoitteena on vähentää hiilidioksidipäästöjä 20 % vuoden 1990 tasosta sekä lisätä uusiutuvan energian määrää 20 % vuoteen 2020 mennessä. Helenin tavoitteena on saavuttaa ilmastoneutraali energialähteen järjestelmä vuoteen 2050 mennessä. Tämän tavoitteen toteuttamiseksi Helen vähentää päästöjä investoimalla energiatehokkuuteen ja uusiutuvan energian tuotantoon. Yritys etsii jatkuvasti kasvu- ja yhteistyömahdollisuuksia päästöttömässä sähkön, lämmön ja jäähdytyksen tuotannossa. (Helen Oy 2017e, Taipale 2016.)

1.5 Teknistaloudellinen vertailu ja tutkimusmenetelmät

Teknistaloudellinen vertailu yhdistää prosessimallinnuksen ja teknisen suunnittelun yhdessä kustannusten arvioinnin kanssa. Vertailun tavoitteena on tarjota laadullinen ja määrällinen ymmärrys uusien teknologioiden ja teknologiamuutosten taloudellisesta toteuttamiskelpoisuudesta. Teknistaloudellinen vertailu on keskeinen työkalu sekä kaupallisten projektien että tutkimusprojektien kehityksessä. Teknistaloudellinen vertailu koostuu neljästä työkalusta: riski ja epävarmuus, kannattavuuslaskenta, simulointi sekä design. (Wallace, 2011.)

Riskiä ja epävarmuutta pyritään arvioimaan omaisuudenhallinnan riskimatriisin avulla, jossa liiketoimintariskejä arvioidaan ennen ja jälkeen mahdollisen investoinnin eri liiketoiminnan näkökohdista. Riskienhallintaan syvennyttään luvussa 7. Taulukkolaskentatyökalu esiintyy tässä diplomityössä investointilaskelmien sekä herkkyysanalyysin merkeissä. Investointilaskelmilla pyritään selvittämään investoinnin kannattavuutta nettonykyarvon kautta, ja herkkyysanalyysin avulla selvitetään alhaisin vaadittava kustannustaso kunnossapitokustannusten osalta, jotta uusien hiilimyllyjen, vaihteistojen ja vaihteistokoteloiden investointi olisi kannattavaa. Investointilaskelmiin ja herkkyysanalyysiin syvennyttään luvussa 8. Simulointityökalua käytetään tarkasteltaessa vaihteistokotelon rakennetta valuteknisestä näkökulmasta. Designityökalua käytetään simulointityökalun tukena, jossa vaihteistokotelon CAD-mallia käytetään valusimuloinneissa. Teknisen tarkastelun tukena käytetään nykyisiä kunnossapitokustannuksia, hiilimyllyjen käyttötunteja, asiantuntijoiden lausuntoja, häiriöraportteja, kunnonvalvonnan värähtelymittauksia sekä NDT-tarkastuspöytäkirjoja. Tekniseen tarkasteluun syvennyttään luvussa 6.

2 Salmisaaren B-voimalaitos

Salmisaari B-voimalaitos on yhteistuotantovoimalaitos, joka on ollut käytössä vuodesta 1984. Voimalaitos on varustettu nurkkapolttoisella luonnonkiertokattilalla, jossa pölypolteetaan kivihiilen lisäksi pellettiä noin 2–5 %:n seossuudella. Pelletin seospoltto aloitettiin Salmisaarella vuonna 2014, ja laitteistolla on mahdollista saavuttaa jopa 7 %:n pellettiosuus kattilatehosta. B-voimalaitoksen sähköteho on 170 MW ja kaukolämpöteho 300 MW. Savukaasujen puhdistukseen B-voimalaitoksella käytetään sähkösuodatinta, puolikuivaa rikinpoistomenetelmää ja katalysaattoria. Salmisaaren voimalaitosalueella käytetään vara-, tuki- ja käynnistyspolttoaineena raskasta polttoöljyä, mutta sen käyttö on hyvin vähäistä. (Helen Oy, 2017d.) Tässä luvussa käydään läpi voimalaitosprosessia, seospolttoa sekä Salmisaaren B-voimalaitoksessa käytettäviä polttoaineita ja niiden käsittelyä. Kuvassa 2.1 näkyvät Salmisaaren voimalaitokset SaA ja SaB.



Kuva 2.1: Salmisaaren voimalaitosalue, B-voimalaitos näkyy kuvassa vasemmalla (Helen Oy, 2016).

2.1 Voimalaitosprosessi ja seospoltto

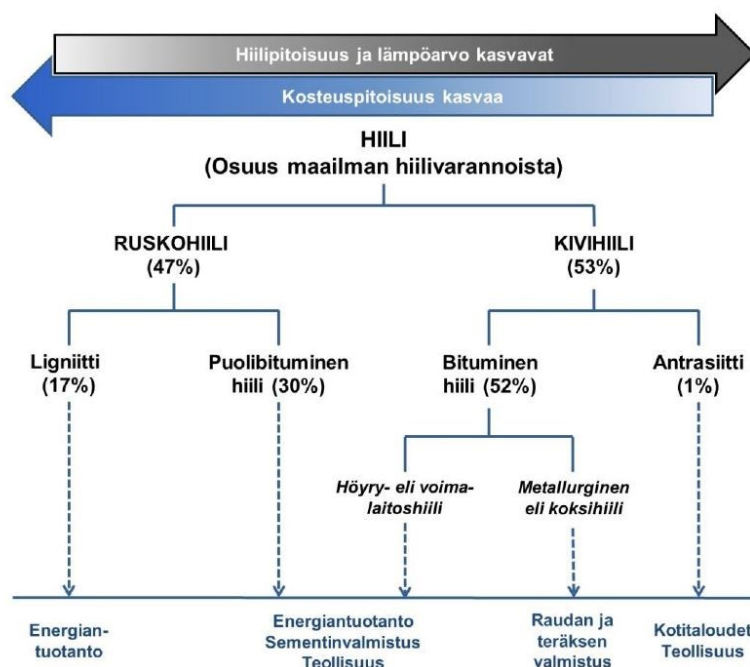
Höyryvoimalaitokset jaetaan vastapainevoimalaitoksiin ja lauhdutusvoimalaitoksiin. Salmisaari B-voimalaitos on toimintaperiaatteeltaan vastapainevoimalaitos. Vastapainevoimalaitoksissa tuotetaan sekä sähköä että kaukolämpöä. Turbiinista ulos tulevan höyryn paine ja sen myötä höyryn lauhtumislämpötila on riittävän korkea, että höyryä voidaan käyttää kaukolämmön tuotantoon. Lauhdutusvoimalaitokset tuottavat vain sähköä, sillä turbiinista ulos tulevan höyryn paine ja lauhtumislämpötila ovat niin matalat, ettei sitä voida käyttää kaukolämmön tuotantoon. (Huhtinen ym. 2008.) Kuvassa 2.2 on nähtävillä höyryvoimalaitoksen prosessikaavio.

Polttoaineen ja palamisilman seos palaa kattilassa, joka tuottaa päätuotteena lämpöä ja sivutuotteena savukaasuja. Syöttövesi pumpataan syöttövesisäiliöltä syöttövesipumpulla kattilaan, jossa vesi höyrystyy. Höyry johdatetaan vielä ennen kattilasta ulospääsyä tulistimille, jossa siihen sidotaan lisää energiaa nostamalla höyryn lämpötilaa. Tuorehöyry ajetaan turbiiniin, jossa osa höyryn lämpö- ja paine-energiasta muuttuu mekaaniseksi energiaksi, joka

tiin, että kaasutusjärjestelmän investointikustannukset sekä Hanasaaren että Salmisaaren tapauksessa olisivat lähes kymmenen kertaa suuremmat kuin suoran seospolton investointikustannukset. (ÅF-Consult Oy, 2009.)

2.2 Polttoaineet

Salmisaaren B-voimalaitoksessa käytetään pääpolttoaineena kivihiiltä. Hiili jaetaan tilastoissa kahteen kategoriaan, ruskohiileen ja kivihiileen. Kivihiilestä suurin osa on bitumista hiiltä, koska kokonaishiilivarannoista vain 1 % on antrasiittia. Bituminen hiili voidaan jakaa käyttökohteen perusteella koksishiileen ja voimalaitoshiileen, jota käytetään kivihiilivoimalaitoksissa. Näiden hiililaatujen jaottelu on esitetty kuvassa 2.3. Voimalaitoshiili on käytetyin hiilituote Suomessa, sen tuontimäärä vaihtelee vuosittain 2,8–5,9 miljoonan tonnin välillä. Suomessa käytettävien voimalaitoshiilien tehollinen lämpöarvo saapumistilassaan vaihtelee 22,59–25,19 MJ/kg välillä ja kosteus on 8,2–14,4 % luokkaa. (Alakangas ym. 2016.)



Kuva 2.3: Hiililaadut sekä käyttökohteet ja osuudet maailman hiilivarannoista (Alakangas ym. 2016).

Lisäpolttoaineena Salmisaaren voimalaitosalueella poltetaan puupellettejä, poikkeuksena uusi pellettilämpökeskus, jonka pääpolttoaineena on puupelletti. Voimalaitosalueella on myös poltettu teollisuuspellettiä ja paahtopellettiä testierissä. (Sillanpää 2017.)

Puupelletit valmistetaan perinteisesti mekaanisen metsäteollisuuden sivutuotteista, kuten sahanpurusta, hiontapölystä ja kutterinlastusta, puristamalla raaka-aineet sylinterin muotoiseksi lyhyiksi tangoiksi. Pellettien raaka-aineeksi soveltuu myös tuore biomassa, metsähake tai kuori, mutta näissä tapauksissa raaka-aine on kuivattava murskauksen jälkeen ennen puristamista. Puun ihannekosteus pellettien valmistuksessa on 10–15 %. Tavallisesti Suomessa valmistettavat pelletit ovat pituudeltaan 10–30 mm ja halkaisijaltaan 8 mm. Pellettien tuhka- ja kosteuspitoisuudet ovat matalia, sillä kosteus vaihtelee 6–10 % välillä ja tuhkapitoisuuskin on vain 0,5 %. Pelletin lämpöarvo vaihtelee 14,0–17,5 MJ/kg välillä tarkoittaen, että yhdessä irtokuutiometrissä pellettejä on 3000–3300 kWh energiaa, irtokuution massan ollessa 640–690 kg. Tällöin yksi tonni pellettejä vaatii 1,5 m³ varastointitilan sisältäen 4700–5000 kWh

energiaa. Pellettien valmistusmäärät ovat Suomessa noin 300 000 tonnin luokkaa vuodessa, mutta pellettejä olisi mahdollista valmistaa jopa 630 000 tonnia vuosittain. (Alakangas ym. 2016.)

Pellettien laatu määritetään kansainvälisen standardin (SFS-EN ISO 17225–2:2014) mukaan. Pellettistandardissa määritellään sekä pienempään kokoluokkaan että teollisuuskäyttöön tarkoitetut puupelletit. Pienemmän kokoluokan pellettejä kutsutaan kotitalouspelleteiksi, ja nämä voidaan jakaa laatuluokkiin A1, A2 ja B. Helenin voimalaitoksilla poltettavat puupelletit ovat enimmäkseen kotitalouspellettejä. Teollisuuspellettien laatuluokat puolestaan ovat I1, I2 ja I3. Pellettien laatuluokan määrittävät puuaineksen kosteus, mekaaninen kestävyys ja hienoaineksen määrä. (Alakangas ym. 2016.) Kuvassa 2.4 on kotitalouspellettejä, kuva on otettu Hanasaaren polttoainenäytteiden esikäsittelylaitoksella.



Kuva 2.4: Puupellettejä

Paahtopelletti eli torrefioitu pelletti valmistetaan paahtamalla puuta tai biomassaa, jonka jälkeen torrefioitu biomassa pelletoidaan. Paahtopelletillä on paremmat palamisominaisuudet kuin tavallisella puupelletillä, johtuen suuremmasta tiheydestä, $750\text{--}850\text{ kg/m}^3$, ja korkeammasta tehollisesta lämpöarvosta, $19\text{--}22\text{ MJ/kg}$. (Bergman, 2005.) Parempien palamisominaisuuksien vuoksi paahtopelletillä on merkittävästi parempi energiatiheys kuin puupelletillä, joten vastaava energia määrä ei tarvitse niin suurta tilaa kuin puupelletin varastoinnissa. Tästä syystä paahtopelletin varastointi ja kuljettaminen on kannattavampaa.

Torrefiointiprosessissa biomassaa paahdetaan noin $200\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa hapettomissa olosuhteissa. Paahtamisessa muodostuu materiaalia, joka muistuttaa tummaa hiiltä, ja lisäksi prosessissa syntyy kondensoituvia ja ei-kondensoituvia kaasuja. Osa kaasuista voidaan ottaa hyötykäyttöön prosessin lämmöntuotannossa, tämä kasvattaa kokonaishyötysuhdetta. Torrefioinnissa häviää 10 % biomassan sisältämästä energiasta ja noin 30 % sen massasta. Prosessin jälkeen torrefioitu biomassa voidaan puristaa pelleteiksi. (Shankar Tumuluru ym. 2011.) Kuvasta 2.5. nähdään miltä paahtopelletti näyttää.



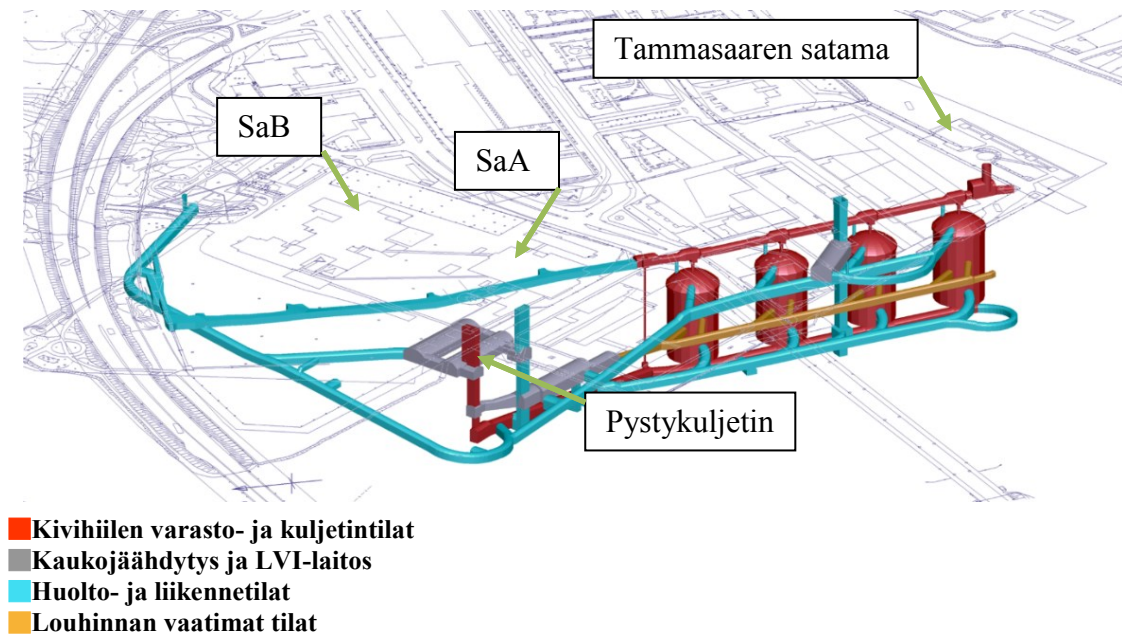
Kuva 2.5: Paahtopellettejä (Biotor Corporation, 2017).

2.3 Polttoaineiden käsittely ja varastointi

Salmisaaren B-voimalaitos suunniteltiin aikoinaan höyryvoimalaitokseksi, jonka pääpolttoaineena toimii kivihiili ja varapolttoaineena raskas polttoöljy. Laitoksen ilme ja toiminta on kuitenkin vuosien saatossa muuttunut. Vanha kivihiilikasa on poistunut Salmisaaren hiilikentältä hiilen varastoinnin siirtyessä maan alle Salmisaaren hiilivarastoon. Polttoainevalikoima on laajentunut fossiilisista polttoaineista puupellettiin, ja savukaasujen puhdistusta on kehitetty tiukentuvien päästönormien sekä ympäristön vuoksi. Tänäkin päivänä hiili on laitoksen pääpolttoaine, mutta lisäpolttoaineena käytetään pellettiä, jotta saavutetaan tavoitteet uusiutuvan energian käytölle (Pesonen, 2017).

2.3.1 Kivihiilen käsittely ja varastointi

Salmisaaren kivihiilitoimitukset saapuvat meriteitse Tammasaareen satamaan, jossa itsepurkavat laivat purkavat kuorman sataman syöttösuppiloihin. Syöttösuppiloista hiili putoaa vaakakuljettimelle, joka kuljettaa hiilen lankunerottimeen. Lankunerottimen toimintaperiaate perustuu lankunerotusrullaan, joka estää liian pitkät kappaleiden päätyksen murskaimeen. Lankunerottimen jälkeen hiili kuljetetaan näytteenottoasemalle, jossa magneetti poistaa hiilen joukosta magneettiset metallit, ja automaattinen näytteenottokauha ottaa näytteen. Näytteenoton jälkeen hiili putoaa maanpinnan alapuolella sijaitsevaan rullaseulamurskaimeen, jossa pyörivät rullat murskaavat hiilen pienempään palakokoon. Hiilen palakoko on säädetty korkeintaan 25 mm siilolaitteiden vuoksi. Murskattu hiili kuljetetaan vaakakuljettimilla hiilitunnelin kautta maanpinnan alapuolella sijaitsevaan hiilivarastoon ja syötetään valittuun hiilisiilon. Hiili syötetään siilon yläosasta, ja täytetään siilo tasaisesti keskeltä ulkoreunaa kohti ruuvikuljetinta käyttäen. Hiilivarastossa on 4 kappaletta 50 000 m³ kokoisia hiilisiiloja, joka tarkoittaa yhteensä noin 200 000 tonnia hiiltä. Siilojen täyttökapasiteetti on 1500 t/h. (Sillanpää, 2017.) Salmisaaren hiilivarasto näkyy kuvassa 2.6.



Kuva 2.6: Salmisaaren maanalainen kivihiihivarasto (Helen Oy, 2016).

Hiilisiiloista hiili puretaan alakautta samaa ruuvikuljetinta käyttäen, mutta päinvastaisella tavalla kuin täyttö, siirtäen hiilen siilon reunoilta kohti keskiosaa. Samaan aikaan siilon pohjassa oleva sulkupelti eli giljotiinipelti avataan, jolloin hiili muodostaa siilon keskelle alaspäin suuntautuvan virtauksen, joka saattaa muistuttaa hieman kraateria. Siilon pohjassa on tärytyslaitteisto, jonka voimakkuutta säätämällä voidaan vaikuttaa siihen kuinka paljon hiiltä siilosta halutaan purkaa. Täryn ansiosta hiili putoaa hihnakuljettimelle, joka kuljettaa hiilen pystynostimen alaosaan. Hiilen määrää säädellään täryn voimakkuudella, ei kuljettimien nopeudella. Hiilen purkukapasiteetti siiloista on 500 t/h, johtuen pystynostimen kapasiteetista. (Sillanpää, 2017.)

Pystynostin kuljettaa hiilen maanpinnalle vanhaan murskaamorakennukseen, jossa jakokuljetin jakaa hiilen joko A-laitokselle tai B-laitokselle, tai molempiin. Jakokuljetin siirtää hiilen vinokuljettimelle, joka kuljettaa hiilen voimalaitoksen hiilivintille. Hiilivintillä hiili jaetaan purkausvaunun avulla päiväsiiloihin. Yhden siilon tilavuus on 1400 m³ ja niitä on 4 kappaletta. Päiväsiilon alaosassa on giljotiinipelti, jolla siilo voidaan tarvittaessa sulkea. Hiili pudotetaan päiväsiilosta sen alapuolella sijaitsevalle hiilenjakajalle. Jokaisella siilolla on oma hiilenjakaja ja jokaista hiilenjakajaa kohden on yksi hiilimylly. (Sillanpää, 2017.)

Hiilenjakaja on kuljetin, joka koostuu lamellikuljettimesta, kolaketjusta ja sekoitusruuvista. Hiili pudotetaan hiilenjakajan takaosaan lamellikuljettimelle, joka siirtää hiilen jakajan etuosassa sijaitsevaan päätylaatikkoon. Päätylaatikon pohjalla oleva sekoitusruuvi pitää huolen siitä, etteivät liian suuret hiilikokkareet päädy hiilimyllyyn vaan hiili on tasalaatuista kun se syötetään hiilimyllyn pudotusputkeen. Lamellikuljettimen lamellien välistä varisee hiiltä, mutta sen alla oleva kolaketju siirtää pudonneet hiilipartikkelit sekoitusruuville. Lamellikuljetin ja kolaketju pyörivät eri suuntiin. Polttoaine annostellaan lamellikuljettimen nopeutta säätämällä hiilimyllyihin tarvittavan kattilatehon mukaisesti. Hiilipatjan paksuutta hiilenjakajassa on mahdollista säätää mekaanisilla vanttiruuveilla. Hiili poistuu jakajasta hiilen pudotusputkea pitkin hiilimyllyyn. (Sillanpää, 2017.) Hiilenjakajan päätylaatikon sivussa on

näytteenottopiste, josta otetaan hiilinäyte päivittäin siitä vastaavan henkilön toimesta. Päivittäisiä hiilinäytteitä kerätään viikon ajalta, jonka jälkeen niin kutsuttu viikkohiili analysoidaan. (Sillanpää, 2017.) Polttoaineiden analysointiin perehdytään luvussa 3.

Hiilenjakajan säätöalue on 12–28 t/h, mutta sitä voidaan ajaa hetkellisesti 30 t/h syöttönopeudella. Näitä syöttöarvoja voidaan pitää myös hiilimyllyn jauhatuskapasiteetin raja-arvoina. Ihanteelliseen syöttönopeuteen vaikuttaa hiilen ominaisuudet sekä kosteus, ja erityisesti Hardgrove-indeksi on olennainen luku jauhautuvuuden kannalta, tähän syvennyttään luvussa 3. K1-kattila kuluttaa keskimäärin noin 78 t/h hiiltä, kun sitä ajetaan täydellä teholla käyttäen ainoastaan hiiltä. (Pesonen, 2017.)

Hiilenjakajalta tuleva hiili jauhetaan hiilimyllyissä, joita Salmisaaren B-voimalaitoksessa on neljä kappaletta. Myllyt ovat tyypiltään kuularengasmyllyjä, ja niiden voimanlähteenä toimii 250 kW sähkömoottori, jonka teho välitetään kartiolieriöpyörävaihteen välityksellä myllyn jauhinmaljaan. Hiili ja pelletti jauhetaan myllyssä yhtäaikaaisesti, jonka jälkeen hiili- ja puupölyn seos siirretään myllystä kattilan polttimille kantoilman avulla, joka tuotetaan myllyilmapuhaltimilla. Lisäksi kattilassa poltetaan raskasta polttoöljyä myllyvaihtojen aikana, voimalaitoksen ylös- ja alasajoissa sekä häiriötilanteissa. (Helen Oy 2017d, Koskinen 2017.) Tarkemmin kuularengasmyllyn ja kartiolieriöpyörävaihteiston toimintaan syvennyttään luvuissa 3.1.1 ja 4.3.

2.3.2 Puupellettien käsittely ja varastointi

Puupellettien varastoinnissa on huomioitava ympäristöolosuhteiden vaikutukset ja pölyräjähdysvaaran riskit. Pellettien varastointi ulkovarastoissa hiilen tavoin ei ole suuren kosteuden takia mahdollista, sillä pelletit ovat kosteutta absorboivia. Korkeat kosteuspiitoisuudet myös aiheuttavat itsestään kuumentumista pelleteissä, sillä kosteus estää eksotermisestä reaktiosta aiheutuvan lämmön haihtumisen ympäristöön. Tästä johtuen varastotilat on pidettävä mahdollisimman kuivina. Varastosiilojen tiiveys ja tähän tarkoitukseen soveltuva ilmanvaihtojärjestelmä ovat tärkeissä rooleissa. Näiden keinojen avulla hidastetaan pellettien biologista hajoamista, ja voidaan vaikuttaa puupölyn määrään sekä polttoaineen varastointilämpötilaan. Puupölyn sekoittuminen ilman kanssa aiheuttaa pölyräjähdysvaaran, josta mahdollisesti aiheutuvia vahinkoja ehkäistään asentamalla varastosiiloihin räjähdysluukut. Edellä mainittujen tekijöiden vuoksi pelletit tulee varastoida maan päällisiin varastosiiloihin. (DEBCO, 2013.)

Salmisaaren voimalaitosalue on haastava paikka pellettien kuljettamista ajatellen, koska se sijaitsee Helsingin kaupungin keskusta-alueella. Pellettien kuljettaminen meriteitse Salmisaareen ei ole kovin järkevää, sillä satama vaatisi merkittäviä investointeja, jotta pellettien vastaanotto ja kuljettaminen satamasta voimalaitokselle onnistuisi. Tästä syystä pelletit kuljetetaan salmisaareen pellettirekoilla. (Kaartokallio, 2014.)

Pelletit kuljetetaan vastaanottoasemalle, jossa kuorma puretaan vastaanottomonttuun. Vastaanottomontusta pelletit siirretään vaaka- ja vinoruuvikuljettimilla näytteenottopaikalle. Näytteenotto tapahtuu automaattisesti, jossa näytteenottokauha ottaa pellettejä pienen määrän ja siirtää näytteet näytteenottosäiliöön. Säiliön sisältö viedään analysoitavaksi kunnes säiliö on täynnä. Näytteenottopisteen jälkeen pelletit kuljetetaan elevaattorilla pellettisiiloihin. (Sillanpää, 2017.) Pelletit analysoidaan ainoastaan vastaanottoasemalle otetuista näytteistä, myöhemmin näytteitä ei enää oteta toisin kuin hiilestä (Pesonen, 2017). Pellettien analysointiin syvennyttään luvussa 3. Voimalaitosalueen ahtauden vuoksi Salmisaareessa on

vain päiväsiilot, joiden kapasiteetti on mitoitettu ottaen huomioon sekä pelletin kulutus että tilankäyttö (Kaartokallio, 2014).

Siiloista pelletit kulkeutuvat siilojen alla sijaitsevalle kuljettimelle, jossa magneetti erottelee magneettiset metalliset pois pellettien joukosta. Tämän jälkeen elevaattori nostaa pelletit takaisin ylös laitoksen yläosaan, josta pelletit siirretään vaakakuljettimella voimalaitokseen. Laitoksen sisällä vaakakuljettimessa on vaaka ja bufferisiilo, joiden antama tieto pellettien painosta ja siilon pinnan korkeudesta ovat kytköksissä pellettien syöttönopeuteen. Pinnan korkeus määrittää kaikkien pellettikuljettimien nopeudet ja siten säätelee pellettien syöttönopeutta. Bufferisiilosta pelletit annostellaan kuljettimilla hiilenjakajien päätylaatikoihin, eli pelletit putoavat suoraan hiilen sekaan sekoitusruuvien päälle, josta ne sitten päätyvät hiilimyllyyn. (Sillanpää, 2017.)

Voimalaitos on suunniteltu täysin hiilelle, eikä tarvitse toimiakseen pelletin seospolttoa. Seospoltto ei myöskään paranna laitoksen toimintaa millään tavalla, joten tarvittava hiilen syöttömäärä on kääntäen verrannollinen pelletin syöttömäärään nähden. Kun pellettiä poltetaan, sen tuottama lämpöteho vähennetään hiilen tuottaman lämpötehon tarpeesta suoraan. Tämän hetkinen polttoainejärjestelmä pystyy käsittelemään korkeintaan 7 % pellettejä kattilan polttoainetehosta (Helen Oy, 2016). Taulukossa 2.1 on esitetty laskennalliset pelletti-osuudet K1-kattilan polttoainetehosta (505 MW) prosenttiosuuksina ja polttoaineen syöttökapasiteetit \dot{m} eri myllykombinaatioille tonneina tunnissa. Todellisuudessa Salmisaassa pellettiä voi syöttää myllyä kohden enintään 4 t/h ja sitä on vähintään syötettävä 0,5 t/h. (Pesonen, 2017.) Laskelmissa on käytetty polttoainetoimittajan ilmoittamaa lämpöarvoa 16,9 MJ/kg ja tiheyttä 650 kg/m³ (VAPO Oy 2015).

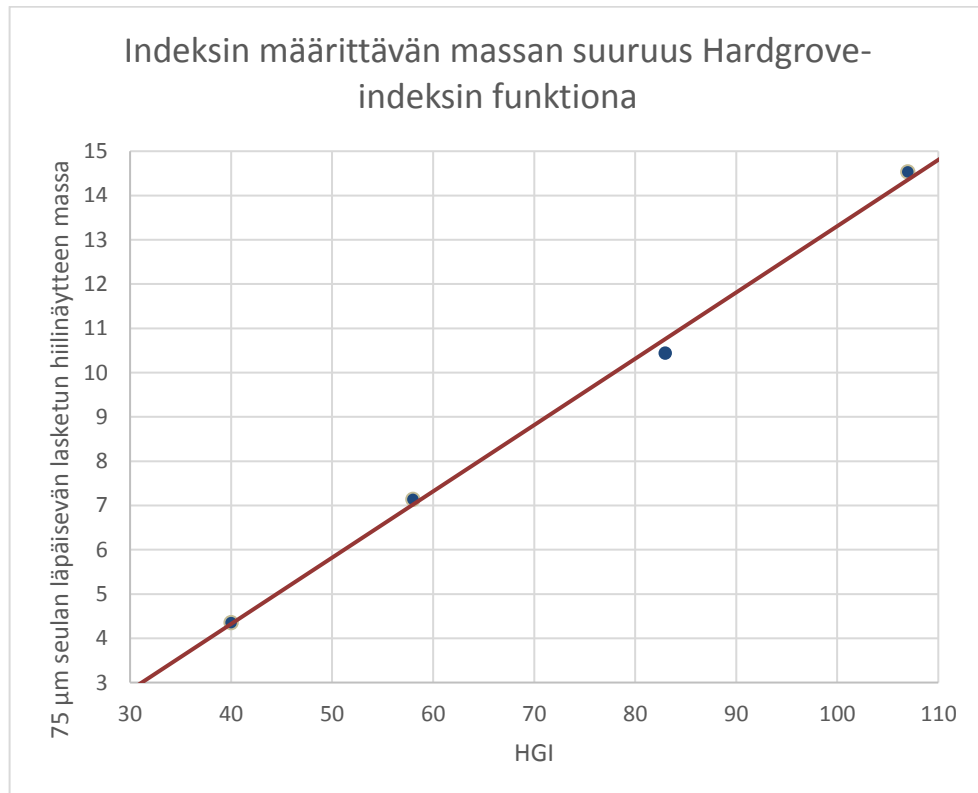
Taulukko 2.1: Laskennalliset pellettiosuudet K1-kattilan polttoainetehosta. Taulukossa on myös pelletti-osuudet eri myllykombinaatioille. Laskennassa on käytetty kattilan polttoainetehoa 505 MW ja pelletin toimittajan ilmoittamaa lämpöarvoa 16,9 MJ/kg.

K1-kattilan polttoaineteho 505 MW						
Prosenttiosuus polttoainetehosta	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %
Pelletin polttoaineteho [MW]	10,1	15,2	20,2	25,3	30,3	35,4
Pelletinsyöttö yhteen myllyyn \dot{m}_1 [t/h]	2,2	3,2	4,3	5,4	6,5	7,5
Pelletinsyöttö kahteen myllyyn \dot{m}_2 [t/h]	1,1	1,6	2,2	2,7	3,2	3,8
Pelletinsyöttö kolmeen myllyyn \dot{m}_3 [t/h]	0,7	1,1	1,4	1,8	2,2	2,5
Pelletinsyöttö neljään myllyyn \dot{m}_4 [t/h]	0,5	0,8	1,1	1,3	1,6	1,9

3 Polttoaineiden jauhautuvuus ja jauhatusmenetelmät

Hiilenjakajalta kerätystä viikkohiilestä analysoidaan hiilen kemiallista koostumusta ja jauhautuvuutta. Hiilen jauhautuvuus kertoo sen partikkelikoosta jauhatuksen jälkeen. Kemiallinen koostumus ja partikkelikoko vaikuttavat hiilen palamiseen kattilassa ja siitä aiheutuviin päästöihin savukaasussa. Hiilen koostumuksella on myös vaikutusta rikinpoistolaitoksen toimintaan ja tuhkan laatuun. Pellettien vastaanotossa otetuista pellettinäytteistä tutkitaan pellettien kemiallista koostumusta. (Sillanpää 2017, Vaahtera 2017).

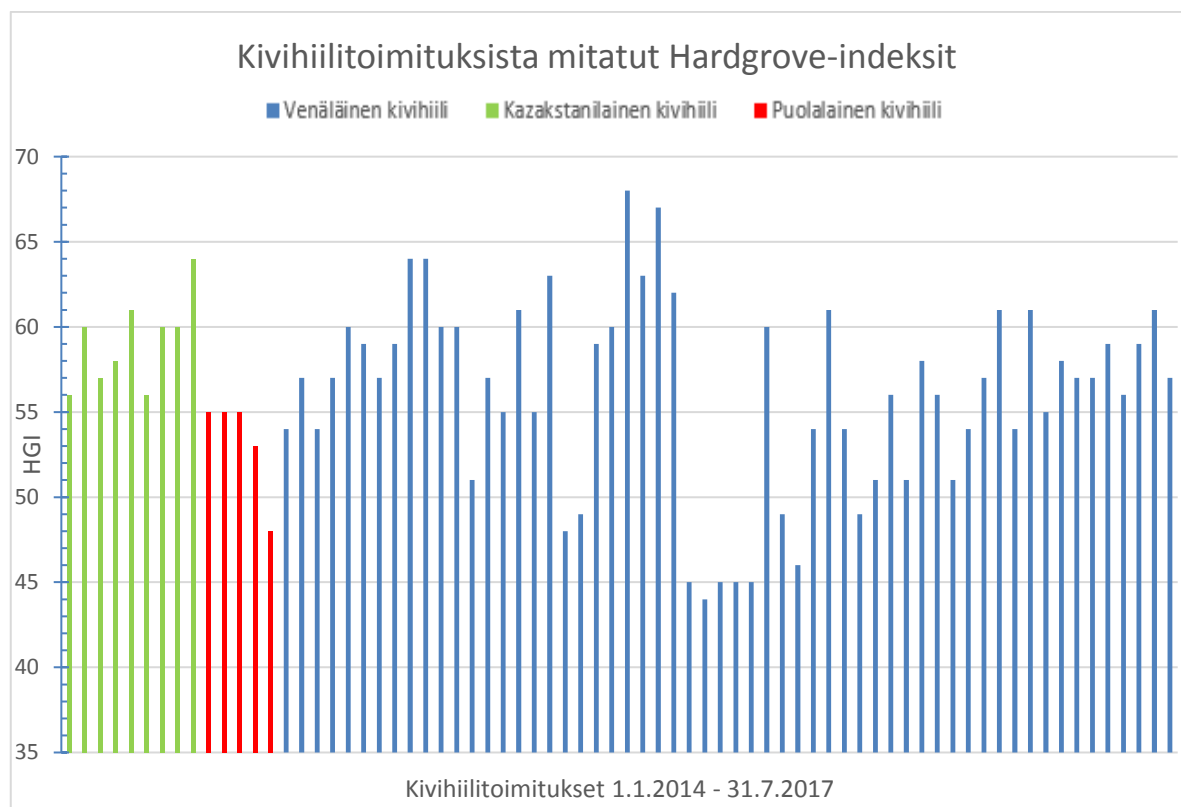
Hiilen murskausvastusta eli jauhautuvuutta kuvataan Hardgroven murskattavuusindeksin avulla, HGI. Indeksä määritellään asteikolla 30–110, jossa korkea indeksi tarkoittaa pehmeää hiiltä ja matala indeksi puolestaan kovaa hiiltä. Pehmeä hiili jauhautuu helpommin pienempään palakokoon. HGI-arvo määritetään Hardgrove-testin mukaisesti (ISO 5074:2015), jossa hiili jauhetaan erityisellä Hardgrove-laitteella ja verrataan testituloksia standardihiiliin. Laitte kalibroidaan käyttäen neljää referenssihiiltä, jotta testi olisi toistettavissa eri kohteissa. Hardgrove-laitte muistuttaa hieman kuularengasmyllyä, jossa kahdeksan halkaisijaltaan 25,4 mm olevaa teräskuulaa pyörii jauhinenrenkaan ja jauhinkulhon välissä 20 ± 1 kierrosta minuutissa jauhaen hiilinäytettä. $(50 \pm 0,01)$ gramman hiilinäyte kuivataan 30–70% ilmankosteudessa ennen testausta. Hiilinäyte seulotaan ja 75 μm seulan läpäisevä hiilimassa punnitaan. Hiilinäytteen massa vähennetään luvusta 50, jolloin erotuksena saadaan indeksin määrittävä massa, joka asetetaan kuvassa 3.1 nähtävän referenssikuvaajan y-akselille. Näin ollen x-akselilta voidaan lukea kyseisen hiilinäytteen HGI-arvo. Kuvaaja perustuu neljän standardihiilen HGI-arvoihin ja niiden indeksin määrittäviin massoihin. (ISO 5074, 1994.) HGI-arvo esitetään raakahiilen kosteuden ja hiilipölyn hienojakoisuuden funktiona (Sato ym. 1996).



Kuva 3.1: Indeksin määrittävän massan suuruus Hardgrove-indeksin funktiona (ISO 5074, 1994).

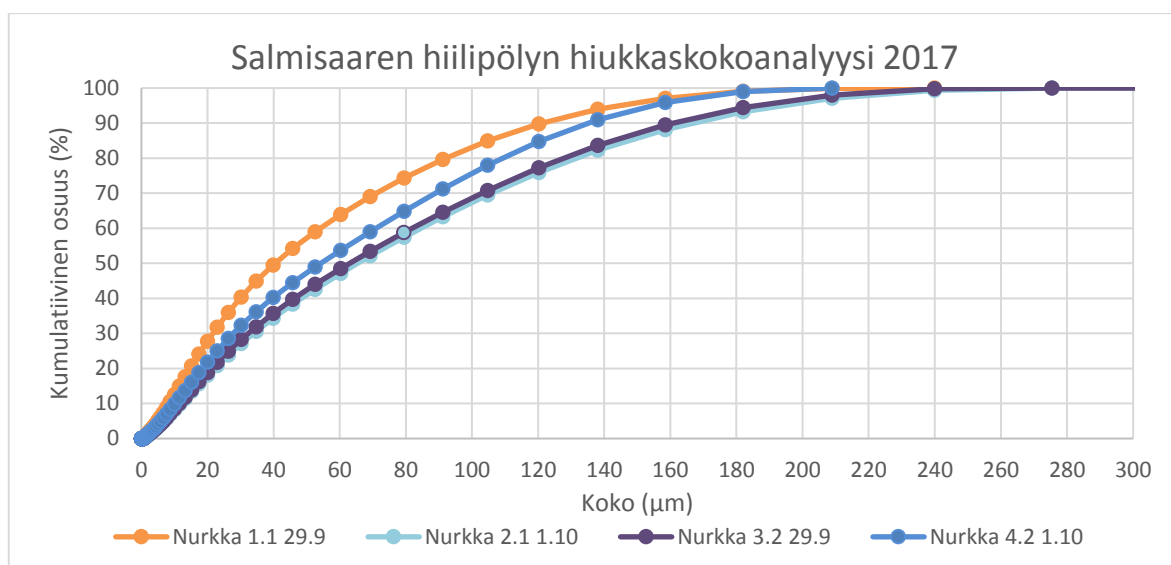
Helen ostaa kivihiiltä Venäjältä, Kazakstanista sekä Puolasta. Kivihiilen toimittajan valintaan vaikuttavat eniten saatavuus ja hinta. Toimittajan mahdolliset toimitusvaikeudet saattavat vaikuttaa kielteisesti sopimuksen syntymiseen tai jatkumiseen. Sopimukset ovat yleensä 6–12 kuukauden pituisia. Tällä hetkellä puolalaista hiiltä ei osteta juuri ollenkaan huonon saatavuuden vuoksi, joka johtuu Puolan korkeasta energian tarpeesta sekä viennin keskittymisestä lähialueille Keski- ja Etelä-Eurooppaan. (Puintila 2017, Loukola 2017.)

Hardgrove-indeksin vaihtelevuutta eri toimittajien välillä vertaillaan kuvassa 3.2, jossa Salmisaareen saapuneet kivihiilen toimituserät koottiin ajalta 1.1.2014–31.7.2017. HGI-arvo vaihteli 44–68 välillä, sekä pienin että suurin arvo oli venäläisellä kivihiilellä. Kazakstanilaisen kivihiilen HGI-arvon vaihteluväli oli 56–64 ja puolalaisen kivihiilen 48–55.



Kuva 3.2: Salmisaareen saapuneet hiilierät 1.1.2014–31.7.2017 välisenä aikana (Helen Oy, 2017c).

Hiilen jauhautuvuutta säädetään hiilimyllyn kuormituspaineen avulla, tarkemmin kuormituspaineen säätöön perehdytään luvussa 3.1.1. Kuormituspainetta on muutettu Salmisaareessa viimeksi 2000-luvun alussa, jotta tuhkan palamattomien ainesosien osuus saatiin laskemaan. (Kontro, 2017.) Hiilipölyn hiukkaskokoa analysoitiin syksyllä 2017 otetuista hiilipölynäytteistä, neljästä mittapisteestä kattilan nurkilla. Tulokset analyysistä nähdään kuvassa 3.3. Hiilipölyn hiukkaskoko eroaa hieman laboratorionäytteeksi jauhetun hiilinäytteen hiukkaskoosta, joka on alle 200 μm (Vaahtera, 2017). Hiukkaskokoanalyysin tuloksien perusteella hiilimyllyn jauhatuskykyä voidaan pitää hyvänä, kun verrataan laboratorionäytteeksi jauhettuun hiukkaskokoon. Kivihiilen HGI-arvolla ja tuhkapitoisuudella on vaikutus jauhinosisen kestävyys, sillä korkea HGI-arvo ja matala tuhkapitoisuus takaavat maksimaalisen kestoajan jauhinosisille (DiVitto, 2017).



Kuva 3.3: Salmisaaren hiilipölyn hiukkaskokoanalyysi 2017 (Kallio, 2017a).

Puupellettien jauhautuvuutta tutkitaan TTBTGI-arvon avulla, joka soveltuu lämpökäsiteltyjen biomassanäytteiden analysointiin. Indeksä saadaan mittaamalla vakiotilavuudessaan ($75 \pm 0,2$) cm³ olevan biomassan taipumus tuottaa hiukkasia, jotka ovat määritellyn koon (500 µm) alapuolella, kun näytettä jauhetaan standardin (ISO 5074:2015) mukaisella Hardgrove-laitteella standardin mukaisissa olosuhteissa. TTBTGI-arvon määrittämisessä Hardgrove-laitteen kalibrointi on hyvin tärkeä ensi askel ennen biomassan jauhautuvuuden tutkimista. Kun kyse kuitenkin on biomassasta, tulee referenssitapauksina olla biomassoja. Testissä käytetään vertailukohteena puupellettejä (ISO 17225-2, A1-luokka) ja puuhiileksi torrefioitua puuta (ISO 17225-1). Näillä referenssimateriaaleilla on määritetyt TTBTGI-arvot ja materiaalit ovat kaupallisesti kaikkien saatavilla. (Ndide ym. 2016.)

Salmisaassa näytteenottosäiliöön kerätyistä pelleteistä jauhetaan pellettinäyte, jonka hiukkaskoko on alle 1mm. Pellettinäytteestä tarkastellaan pellettien laatua ja sitä, että ne noudattavat valmistajan ilmoittamia ominaisuuksia. Pelletin jauhatustulokset laboratorio-olosuhteissa poikkeavat melko paljon voimalaitosprosessissa kuularengasmyllyillä jauhetusta puupölystä. Pelletti ei kuularengasmyllyssä jauhaannu raekokoaan pienemmäksi. (Vaahtera, 2017.) Tällöin puupölyn palakokojakauma on hyvin lähellä pelletin raekokojakaumaa. Taulukossa 3.1. nähdään tutkimustuloksia Vapon kotitalouspelletin raekoosta.

Taulukko 3.1: Vapo Oy:n tutkimustuloksia kotitalouspellettien raekoista (Fränti-Pirttimaa, 2015).

	Vapo kotitalouspelletti, Vilppula	Vapo kotitalouspelletti, Turenki	Vapo kotitalouspelletti, Haukineva	Laatuluokkien raja-arvot		
				I1	I2	I3
< 3,15 mm						
[%]	99,4	98,8	96,8	99	98	97
< 2,0 mm						
[%]	98,2	95,0	91,7	95	90	85
< 1,0 mm						
[%]	87,3	61,5	47,9	60	50	40
Luokitustulos	I1	I2	I3			
Näyte	Salmisaari maaliskuu 2015	Hanasaari joulukuu 2015	Salmisaari helmikuu 2015			

3.1 Jauhatusmenetelmät

Jauhatuslaitteistojen tärkein tehtävä on jauhaa raakamateriaali hienoksi pölyksi, tuotantoprosessin asettamien vaatimusten mukaiseen partikkelikokoon. Tässä luvussa käydään läpi kivihiilen jauhatuksessa käytettävien kuularengas- ja valssimyllyjen toimintaperiaatteita sekä myllyjen käyttöä eri kohteissa.

3.1.1 Kuularengasmylly

Kuularengasmylly (*engl. vertical ball ring mill*) soveltuu hyvin monenlaisiin käyttökohteisiin ja niiden erikoisvaatimukseen laajan toimintakapasiteettinsa vuoksi, joka voi vaihdella 1–130 t/h välillä. Kuularengasmyllyjä käytetään voimalaitoksissa, sementti- ja terästehtaissa, kaasutuslaitoksissa sekä mineraalien käsittelyssä. Myllyllä on mahdollista jauhaa lämpötilaltaan korkeita raakamateriaaleja, joiden kosteus on maksimissaan 25 %. (Claudius Peters GmbH, 2017.) Kuularengasmyllyllä voidaan jauhaa useita eri hiililaatuja. Kuularengasmyllyjen jauhatuskapasiteetti on alhainen, mutta ne ovat kompakteja kooltaan. Myllyn investointikustannukset ovat alhaiset verrattuna muihin hiilimyllyihin, mutta kunnossapitokustannukset puolestaan ovat verrattain korkeat. (Miller, 2017.)

Kuularengasmyllyn toiminta perustuu alemman jauhinenrenkaan ja kuulien väliseen puristusvoimaan, joka murskaa hiilen hienoksi pölyksi. Hiili putoaa pudotusputkea pitkin alemman jauhinenrenkaan peitelevyn päälle ja sinkoaa keskipakovoiman vaikutuksesta jauhinenrenkaiden ulkokehälle jauhinkuulien ja alajauhinenrenkaan väliin. Ylempi jauhinenrengas pysyy paikallaan, kun alempi jauhinenrengas pyörittää kuulia. Tästä johtuen jauhinkuulat pyörivät jonossa jauhinenrenkaiden urien välissä. Voimanlähteenä toimii sähkömoottori, jonka teho välittyy vaihteiston välityksellä alajauhinenrenkaalle. Puristusvoimaa eli kuormituspainetta säädetään hydraulisylinterien avulla, jotka ovat kiinnitetty jousikiristyskehykseen neljällä erikoisvaijerilla. (Claudius Peters GmbH, 1985a.) Jousikiristyskehyksessä on korvakkeet, joiden tehtävänä on pitää kehys paikoillaan. Ilman korvakkeita, alajauhinenrenkaan ja jauhinkuulien pyörimisliike välittyisi yläjauhinenrenkaan kautta jousikiristyskehykseen, joka pyörisi jauhinosien mukana. Jousikiristyskehyksen korvakkeisiin asennetaan kulutus- eli iskupaloja, joiden avulla säädetään välitys korvakkeiden ja myllyn seinämien välissä. (Malkki, 2017a.)

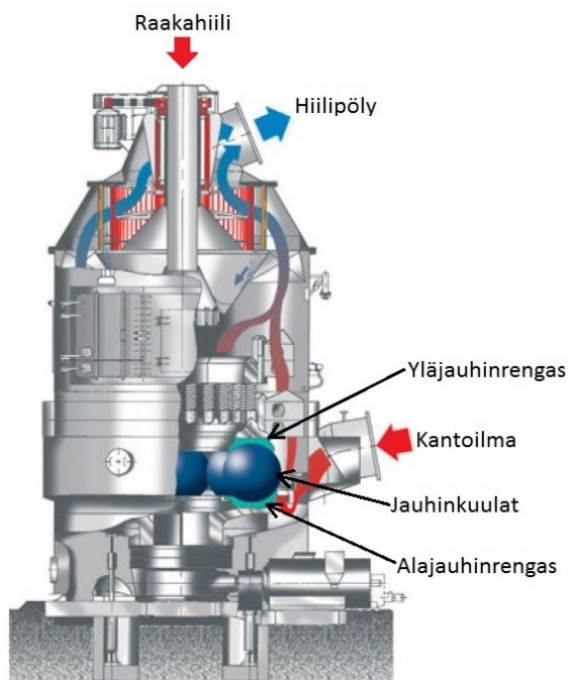
Erikoisvaijerit ovat valmistettu pienistä ja littanoista säikeistä, jonka johdosta vaijerista on saatu pyöreä. Pyöreä muodon vuoksi vaijerin läpivienneissä on hyvin vähän vuotoja ja muoto vähentää tiivistysilman tarvetta. (Koskinen, 2017.) Jousikiristyskehys välittää vaijeriden vetovoiman painejousien avulla painerenkaalle, joka puolestaan painaa yläjauhinenrengasta alaspäin jauhinkuulia vasten. Jouset toimivat myös pehmusteena, jos jauhinkuulat joutuvat kulkemaan jonkin vieraan esineen yli. Korkeampi kuormituspainetta takaa raakamateriaalin paremman jauhautuvuuden, mutta sen liiallista nousua on rajoitettava. Painerenkaan aiheuttava kuormituspainetta välittyy alajauhinenrenkaan kautta jauhinenmaljaan, johon vaihteiston akseli on kiinnitetty. Liian suuri kuormituspainetta täten rasittaa vaihteiston painelaakereita, joka vaikuttaa vaihteiston käyttöikänsä. Kuormituspainetta säädetään myös alaspäin esimerkiksi käynnistystilanteissa, jotta kuormattu mylly saadaan käynnistettyä. Jauhatusprosessissa alajauhinenrenkaan päälle syntyy jauhatuspeti, jonka korkeus vaihtelee tavallisesti 10–20 mm välillä. Jauhatuspetin korkeus riippuu puristusvoiman suuruudesta ja hiililaadusta. (Claudius Peters GmbH, 1985a.) Kuormituspainetta ei säädetä reaaliajassa, vaan sitä muutetaan ainoastaan silloin kuin halutaan tutkia hiilen todellista jauhautuvuutta myllyissä hiilipölynäytteiden avulla. Hydraulisylinterien öljynpaine on maksimissaan 60 bar, mutta optimitilanteessa öljynpaine pysyttelee 50–55 bar välissä. (Kontro, 2017.)

Jauhinkuulien määrä myllyssä saattaa vaihdella, Salmisaaren voimalaitoksessa käytettävissä myllyissä kuulia on 5 kappaletta ja niiden halkaisija on 92 cm, kun taas Hanasaaren voimalaitoksen myllyissä on 9 pienempää kuulaa. Salmisaaren myllyjen tapauksessa kuulat ovat rakenteeltaan onttoja ja ne on valmistettu kulumisenkestävästä erikoisvaluteräksestä. Kuulat kuluvat käytössä tasaisesti johtuen kuulien vapaasta pyörivästä liikkeestä jauhinenkaiden välissä. Hanasaaren myllyissä voidaan myllyyn tarvittaessa asentaa lisäkuula korvaamaan jauhinenkaiden välissä vallitseva ylimääräinen tila, jonka kuulien kuluminen aiheuttaa. (Claudius Peters GmbH 1985a, Koskinen 2017.)

On ymmärrettävää, ettei mylly kykene jauhamaan koko hiilimäärää lopulliseen hienouteen kerralla, vaan osa hiilestä jää karkeaksi murskaksi. Hiilipölyn ja karkean hiilimurskan seos siirtyy suutinrenkaalle, joka sijaitsee jauhinenkaiden ulkopuolella. Myllyilmapuhaltimilla tuotettu kantoilma eli primääri-ilma virtaa sisään ilmansyöttöyhteistä ilmaohjaukammioon, joka jakaa ilmavirran tasaisesti sen yläpuolella olevalle suutinrenkaalle. Suutinrenkaassa kantoilman nopeus kasvaa jopa kolminkertaiseksi riippuen kuormitusasteesta. Renkaan rakenteesta johtuen kantoilma nostattaa jauhettua polttoaineseosta pyörteen lailla ylöspäin samalla kuivaten sitä. Kantoilman nopeus laskee huomattavasti jauhinenkaiden yläpuolella, jolloin painovoima seuloo raskaat ja karkeat hiilipartikkelit takaisin jauhatusprosessiin. Kevyemmät ja hienommat hiilipartikkelit päätyvät myllyn yläosassa sijaitsevaan seulaan. Ehkäistäkseen suutinrenkaan alapuolta likaantumasta mylly on varustettu puhdistusharjoilla, jotka pitävät suutinrenkaan puhtaana (Kontro, 2017). Jotta mylly olisi tiivis, se tarvitsee tiivistysilmaa vaijereiden läpivienneissä ja labyrinthitiivistä. Labyrinthitiivistettä käytetään tiivistämään jauhinenmaljan kaula myllyn sisätilaan. (Claudius Peters GmbH, 1985a.)

Seula voi olla rakenteeltaan kiinteä tai pyörivä. Seulojen avulla estetään liian suurien partikkeleiden pääsy hiilipölyputkiin ja palautetaan ne takaisin alajauhinenkaalle uudelleen jauhettavaksi. Kiinteää seulaa kutsutaan keskipakoseulaksi, jonka seulontamenetelmä muistuttaa syklonin toimintaperiaatetta. Kantoilma ja hiilipartikkelit kohtaavat seulan läpät tangentiaalisesti pyörivän virtauksen vuoksi. (Claudius Peters GmbH, 1985a.) Jauhatushienoutta voidaan muuttaa säätämällä seulan läppien asentoa, mutta tämä onnistuu vain kun mylly on pysähdyksissä, joka tarkoittaa pidempää seisokkia tai vuosihuoltoa. Mylly voidaan varustaa kiinteän seulan sijaan pyörivällä seulalla, jonka voiman lähteenä toimii sähkömoottori. Pyörivällä seulalla varustetussa myllyssä polttoaineseos on niin ikään pyörivässä virtauksessa, mutta tässä tapauksessa pyörivän virtaus saadaan aikaan seulan pyörimisliikkeellä. Seulan läpäisevä hienousaste on suoraan verrannollinen roottorin pyörimisnopeuteen, jota säädetään taajuusmuuttajan avulla. (Claudius Peters GmbH 2017, Koskinen 2017.) Salmisaaren B-voimalaitoksella on kokeiltu pyörivän seulan käyttöä yhdessä myllyssä. Kokeilun tavoitteena oli pienentää NOx-päästöjä, joka perustui pienempään hiilipölyn partikkelikokoon. Pyörivä seula tutkitusti vähensi hieman NOx-päästöjä, mutta siitä ei koettu olevan merkittävää hyötyä, sillä pyörivän seulan kunnossapito on työlästä. (Koskinen, 2017.)

Lopullisen hienousasteen saavutettua hiilipöly poistuu myllystä ja se johdetaan kantoilman voimin kattilan hiilipölypolttimeen. Tästä syystä on tärkeää, että laitoksen suunnittelussa huomioidaan riittävä kantoilman voimakkuus. (Claudius Peters GmbH, 1985a.) Hiilipölyputkien alussa, myllyn päällä sijaitsevat jakaumapellit, joiden avulla varmistetaan hiilipölyn tasainen jakautuminen kattilan polttimille (Koskinen, 2017). Kuvassa 3.4 on nähtävissä kuularengasmyllyn rakenne.



Kuva 3.4: Halkileikkauskuva kuularengasmyllystä (Claudius Peters GmbH, 2017).

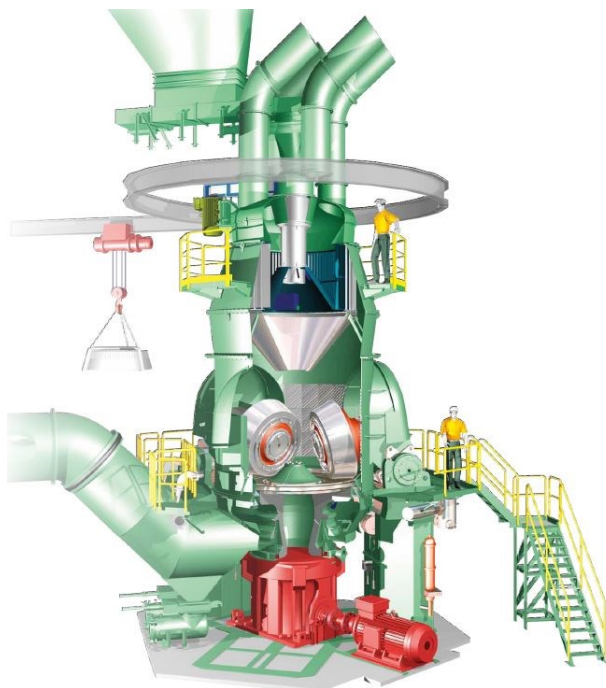
3.1.2 Valssimylly

Valssimyllyt (engl. vertical roller mill) soveltuvat kuularengasmyllyn tavoin moniin erilaisiin käyttökohteisiin, mutta niitä käytetään enimmäkseen sementin ja hiilen jauhatuksessa. Myllyn monikäyttöisyyttä lisää sen kyky suorittaa raakamateriaalin käsittelyn useita eri vaiheita, tämä vähentää materiaalin käsittelyyn tarvittavia laitteita. Jauhatusvaiheen lisäksi mylly pystyy murskaamaan raakamateriaalin ennen jauhatusta ja seulomaan sekä kuivamaan lopputuotteen haluttuun kokoon ja tilaan. (Altun ym. 2017.) Valssimylly pystyy vastaamaan hyvin nopeasti polttoainevaihdoksiin, mutta silti säilyttäen kohtuullisen hienojakaisuuden raakamateriaalin jauhatuksessa. Jauhatusprosessista muodostuvat värinät ovat vähäisiä. Valssimyllyllä on vähäinen kunnossapidon tarve verrattuna kuularengasmyllyyn, sekä myllyn jauhatustulos säilyy hyvänä jauhinosen kuluessakin. Valssimyllyn huonona puolena on alhainen lopputuotteen maksimi ulostulolämpötila, joka on noin 100 °C. (Miller, 2017.) Valssimyllyillä on korkeampi jauhatuskapasiteetti kuin kuularengasmyllyillä jauhatuksen hyötysuhteiden ollessa yhtä suuria. Korkeampi jauhatuskapasiteetti perustuu korkeampiin kitkakertoimiin, jotka vaikuttavat suoraan jauhatustehon kasvuun. (Sato ym. 1996.) Eräs myllytoimittaja valmistaa valssimyllyjä 8–240 t/h jauhatuskapasiteetilla (Loesche energy systems Ltd, 2017).

Valssimyllyn toiminta perustuu pyörivän jauhinpöydän ja valssien väliseen puristusvoimaan, joka murskaa jauhinpöydälle syötetyn raakahiileen hienoksi hiilipölyksi. Valssit ovat joko kartiomaisia tai rengasmaisia rullia, ja jauhinpöytä on joko suora tai kulhomainen. Raakahiili syötetään myllyn syöttösuppiloon, josta se putoaa jauhinpöydän keskiosaan. Raakahiili sinkoutuu jauhinpöydän pyörimisliikkeen voimasta ulkokehälle, jossa se päättyy valssien ja jauhinpöydän väliin. Jauhautunut hiili kulkeutuu suutinrenkaalle, joka sijaitsee jauhinpöydän ympärillä. Myllyilmapuhaltimilla tuotettu kuuma primääri- eli kantoilma muuttuu suutinrenkaassa pyörteiseksi virtaukseksi samalla haihduttaen kosteuden pois ja nostaa jauhetun hiilipölyn seulalle myllyn yläosaan. Hiilipölyn hienoudesta riippuen osa jauhetusta hiilestä läpäisee seulan ja päättyy hiilipölyputkia pitkin kattilan polttimiin, kun taas liian suuren hiilipartikkelit palaavat pölyn palautuskartion kautta takaisin jauhinpöydälle uudelleen.

jauhatusta varten. Valssimyllyt voidaan kuularengasmyllyjen tapaan varustaa joko kiinteällä tai pyörivällä seulalla. (Loesche energy systems Ltd 2017, Woodruff, ym. 1998.)

Myllyä pyöritetään sähkömoottorilla, jonka teho siirtyy tyypillisesti kartiolieriöpyörä- tai kartioplaneettapyörävaihteiston välityksellä jauhinpöytään. Jauhatuksen kuormituspainetta säädetään hydraulisyylintereillä, jotka puristavat valsseja jauhinpöytää kohti. Valssit voivat olla itsenäisiä kokoonpanoja ja niiden puristusvoimaa voidaan säätää yksilöllisesti, tai valssit voivat olla osana jousikuormitteista painekehystä, jonka kuormituspainetta säädetään hydraulisyylinterien avulla. Painekehysratkaisussa sylinterit välittävät vetävän voimansa painekehukseen kuormitusvaijereiden avulla. (Woodruff ym. 1998.) Valssien ollessa itsenäisiä kokoonpanoja, käytetään kaksitoimisia hydraulisyylintereitä, jotka mahdollistavat myös valsien nostamisen. Tämän ansiosta mylly voidaan käynnistää käyttäen pienempää vääntömomenttia riippumatta siitä, onko mylly kuormattu vai ei. (Loesche energy systems Ltd, 2017.) Valssit ovat tavallisesti päällystettyjä, ja jauhinpöytä on jaettavissa useampaan osaan. Vaihdevälikkeiden päällysteiden ja jaettavissa olevan jauhinpöydän ansiosta valssimyllyn huollettavuus on helpompaa ja huollon tarve vähäisempi (Woodruff ym. 1998.) Kuvassa 3.5 on nähtävissä valssimyllyn rakenne.



Kuva 3.5: Valssimylly kartiomaisilla valsseilla ja suoralla jauhinpöydällä (Loesche energy systems Ltd, 2017).

4 Jauhatuksessa käytettävät vaihteistot

Vaihteistojen pääasiallisena tehtävänä on siirtää tehoa ja muuttaa pyörimisnopeutta kahden akselin välillä joko kiinteällä tai portaittain valittavalla välityssuhteella. Lisäksi vaihteistoja käytetään muuttamaan pyörimissuuntaa. (Airila, ym. 1985.) Tässä luvussa kuvataan eri vaihdetyypit ja niistä koostuvat moniportaiset vaihteistot sekä puhutaan vaihteistoissa käytettävistä laakerointimenetelmistä ja voitelujärjestelmistä.

4.1 Vaihteiston valinta

Jauhatuksessa käytettävien vaihteistojen valintaan vaikuttaa moni asia, kuten jauhatuslaitteistotyyppi ja tilankäyttö muun muassa. Kuularenkas- ja valssimyllyt ovat rakenteeltaan sellaisia, että myllyjä käyttävä akseli on pystysuorassa, tällöin vaihteiston on mahdollista myllyn alle ja vaihteiston pääakselin on kannettava siihen aksiaalisesti kohdistuva staattinen myllyn kuormitusvoima, joka on tavallisesti noin 40–50 tonnia eli noin 392–490 kN. Tämän lisäksi jauhatusprosessista aiheutuu iskutyypistä dynaamista kuormitusta joka voi olla jopa kolminkertainen staattiseen kuormitukseen verrattuna. Myllyn alla sijaitsee vaihteiston peti, joka on suunniteltu alkuperäiselle vaihteistolle. Mikäli vaihteistoa joudutaan vaihtamaan, myös uuden vaihteiston on oltava mitoiltaan soveltuva pedille ja sen kotelossa on oltava sopiva pulttijako. Suurten kokoluokkien koneilla petien muuttaminen on kallista. vaihteiston ensiöakselin napakorkeuden on oltava sopiva siihen suunniteltua moottoria ajatellen. (Luukko 2017, Koskinen 2017.)

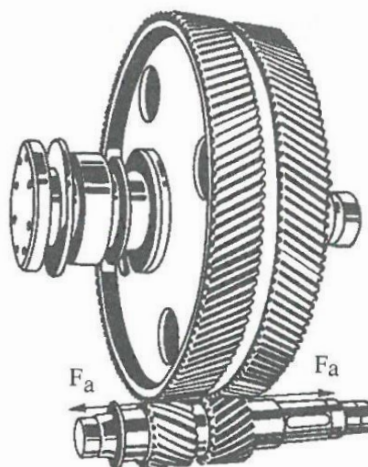
Vaihteiston vaihdon yhteydessä voidaan joutua vaihtamaan myös moottori tai kytkin tai molemmat, jolloin tämä on otettava huomioon vaihteistoa hankkiessa. Merkittävänä osana vaihteiston käyttöä on sen öljynkierrätysjärjestelmä, joka vastaa vaihteiston voitelusta. vaihteiston uusimisen yhteydessä on tarkistettava öljynkierrätysjärjestelmän toimivuus sekä suodattimien kunto. Mikäli toimivuudessa tai suodattimien kunnossa on merkittäviä puutteita, kannattaa järjestelmä uusia vaihteiston vaihdon yhteydessä. Järjestelmä kannattaa varustaa vaihtosuodattimilla, sillä ne sallivat suodattimien vaihdot ilman järjestelmän alas ajamista. Vaihteistoa hankkiessa on myös kiinnitettävä huomioita sen huollettavuuteen ja varaosien saatavuuteen. (Luukko 2017, Koskinen 2017.)

Hammaspyörät valmistetaan tyypillisesti karkaistusta tai pintakarkaistusta teräksestä, mutta niiden valmistuksessa käytetään myös muita materiaaleja muun muassa erilaisia seosteräksiä, hiiliteräksiä, valurautaa sekä muita metalleja ja muoveja. Joskus käyttöpyörässä käytetään kovempaa materiaalia kuin toisiopyörässä, koska käyttöpyörän hampaat koskettavat toisiopyörän hampaita useammin kuin toisiopyörän hampaat koskettavat käyttöpyörän hampaita. Tämä pätee sovelluksissa, joissa vaihteiston tehtävä on alentaa pyörimisnopeutta, ja näin ollen käyttöpyörä on toisiopyörää pienempi. (Childs, 2013.)

4.2 Hammasvaihdetyypit

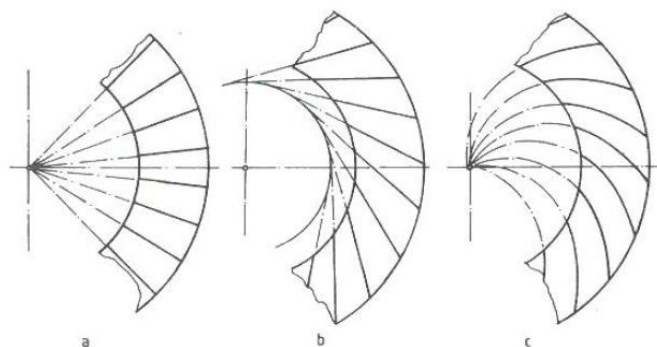
Vaihdetyypit voidaan hammasvaihteissa jakaa kolmeen kategoriaan: lieriö- ja kartiohammasvaihteisiin sekä planeettavaihteisiin. Lieriöhammasvaihteet ovat edullisimpia vaihteita samansuuntaisten akselien sovelluksissa. Niiden tärkein tehtävä on muuttaa toisioakselin pyörimisnopeutta ja -suuntaa samansuuntaiseen ensiöakseliin eli käyttöpyörään nähden hammaspyöräparille määritetyllä välityssuhteella. Lieriöhammasvaihdetta käytetään yleisesti vaihteistoissa, sähkötyökaluissa ja kuljetinjärjestelmissä sekä ajastusmekanismeissa. (Childs, 2013.)

Lieriöhammasvaihteessa hammaspyörät ovat joko suora tai vinohampaisia. Vinohampaiset vaihteet ovat yleisempiä, sillä vinohampaisella pyörällä on parempi tehonsiirtokyky ja hiljaisempi käyntiäänä verrattuna suorahampaiseen hammaspyörään. Hampaan pituutta ja kulmaa kasvattamalla voidaan vaikuttaa tehonsiirtokyvyn parantumiseen. Käytännön ongelmana hammaskulman kasvaessa on suurempi aksiaalinen kuorma, jonka vuoksi normaalisti hammaskulma on melko pieni, noin 8° ... 15° . Suhteellisen pienestä hammaskulmasta riippumatta, laakerien mitoittaminen on hankalaa nykypäivän tehonsiirtovaatimuksilla. Hammaspyörän laakerien kantokykyvaatimukset radiaalisen kuorman suhteen aiheuttavat hankaluuksia. Suuren radiaalisen kuorman kestävillä laakerityypeillä on usein alhainen kantokyky aksiaalisen kuorman suhteen, esimerkki tällaisesta laakerista on laipalliset lieriörullalaakerit. Laakeriongelmistä johtuen tehonsiirtokykyä ei voida lisätä yhtä hammaspyöräparia käyttämällä. Tehonsiirtokykyä voidaan lisätä, kun samalle akselille sijoitetaan erikätinen vinohammaspyörä. Tällöin teho välittyy kahden hammaspyöräparin kautta. Erikätinen vinohammaspyörä tarkoittaa hammaspyörää, jossa hammaskulma on kuin peilikuva toisesta hammaspyörästä. (Björk ym. 2014.) Tällaista kokoonpanoa kutsutaan nuolihammastetuksi lieriöpyöräpariksi, joka nähdään kuvassa 4.1.



Kuva 4.1: Nuolihammastettu lieriöpyöräpari (Björk ym. 2014).

Kartiohammasvaihteen tärkein tehtävä on välittää vääntömomentti risteävästi toisiinsa nähdessä kohdistuvien akselien välillä. Akselit ovat lähes poikkeuksetta kohtisuorassa toisiaan vastaan. Kartiohammasvaihteessa sekä ensiö- että toisiohammaspyörä ovat nimensä mukaisesti kartiomaisia. Kartiomaisen muodon vuoksi tällaisen hammaspyörän valmistus on vaikeampaa ja kalliimpaa kuin lieriöhammaspyörän. Kartiohammasvaihteita suositetaan niiden vähäisen tilan tarpeen vuoksi. Niitä käytetään yleisesti voimansiirrossa kuten lieriö- ja planeettavaihteistoissa sekä tasauspyörästöissä. Kartiohammaspyörien myynti on huomattavasti vähäisempää kuin lieriöhammaspyörien, ja osittain tästä johtuen kartiohammaspyörien hinta on korkea. (Airila ym. 1985.) Korkeat investointikustannukset johtuvat myös siitä, että kartiohammaspyörät valmistetaan aina pareittain ja yleisesti ottaen hammaspyörät eivät ole keskenään vaihtokelpoisia (Childs, 2013). Kartiohammaspyörät jaetaan kolmeen ryhmään; suorahampaisiin, vinohampaisiin ja kaarihampaisiin. (Airila ym. 1985.) Kategoriat ovat esiteltynä kuvassa 4.2.



Kuva 4.2: a) Suorahampainen, b) Vinohampainen ja c) Kaarihampainen kartiohammaspyörä (Airila ym. 1985).

Suorahampaisissa kartiohammasvaihteissa hampaat ovat nimensä mukaisesti suoria ja tällaiset vaihteet saattavat olla meluisia, johtuen hammaspyörien hampaiden jyrkästä geometriasta. Töksähtävä hampaiden kosketus kertoo vaihteen mahdollisuudesta altistua korkeille törmäyskuormituksille, mikäli vaihdetta käytetään raskailla kuormilla tai korkeilla pyörimisnopeuksilla. Suuret törmäyskuormitukset saattavat aiheuttaa vaurioita vaihteissa ja hampaissa. (Childs, 2013.)

Vinohampaisissa kartiohammasvaihteissa hampaat ovat vinossa kun taas suorahampaisissa kartiohammaspyörissä ne ovat kohtisuorassa akseliin nähden. Vinohampaiset kartiohammasvaihteet ovat hiljaisempia ja niillä on suurempi tehonsiirtokyky kuin suorahampaisilla. (Airila ym. 1985.) Vinohampaisuuden ansiosta saavutettu korkeampi tehonsiirtokyky tuli esiin jo edellä mainituissa lieriöhammasvaihteissa.

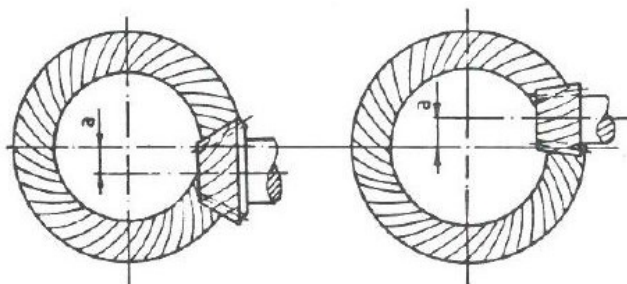
Kaarihampaisissa kartiohammasvaihteissa hampaat ovat kaarevat ja ne kulkevat spiraalikulman mukaista linjaa pitkin hammaspyörän ulkokehältä akselin keskelle saakka, jossa kaikki linjat kuvainnollisesti kohtaavat toisensa. Kaarihampaisten kartiohammasvaihteiden etuna on asteittainen hammaskosketus, jossa yksi hampaan pää koskettaa toisen hammaspyörän hammasväliä ensin ja hiljalleen kosketus siirtyy koko hampaalle. Tämä takaa sulavan tehonsiirron ja vähentää hampaiden rikkoontumisen riskiä sekä tekee kaarihampaisista kartiohammasvaihteista hiljaisempia kuin suorahampaisista. Myös tästä johtuen kaarihampaiset kartiohammasvaihteet kykenevät siirtämään saman tehon kuin suorahampaiset, mutta käyttäen halkaisijaltaan pienempiä hammaspyöriä. (Childs, 2013.)

Nykyään on olemassa myös neljäs kartiohammaspyörän muoto, sitä kutsutaan Zerol-hammaspyöräksi. Zerol-kartiohammasvaihteissa hampaat ovat kaarevat, mutta niiden spiraalikulma on nolla. Paremmiin hampaanmuotoon selviää kuvasta 4.3. Ne edustavat suorahampaisen ja kaarihampaisen hammasvaihteen välimuotoa. Kaarevan hampaan tuomat edut sulavan tehonsiirron ja hiljaisemman vaihteen suhteen pätevät myös Zerol-kartiohammasvaihteen tapauksessa, mutta kyseinen vaihte aiheuttaa sivuttaiskuormitusta hammaspyörille. (Childs, 2013.)



Kuva 4.3: Zerol-kartiohammaspyöräpari. (Designatronics Inc, 2017)

Kartiohammaspyöräparista voidaan myös muodostaa hypoidivaihte, joka on ruuvipyöräparin sovellus. Perinteinen ruuvipyöräpari muodostetaan kahdesta lieriöhammaspyörästä, joilla on eri vinouskulmat. Lieriöhammaspyörät asetetaan risteävään asemaan, yleensä 90° asteen kulmaan toisiinsa nähden. Hypoidivaihte rakentuu vino- ja kaarihampaisista kartiohammaspyörästä, joita käytetään ruuvipyörinä. Erona perinteiseen kartiopyörähammasvaihteeseen on, että hypoidivaihteessa kartiopyöräparin ensiöakseli ei ole toisiopyörän keskellä, vaan se on siirretty hieman sivuun. Ensiöakseli on mahdollista laakeroida hammastuksen molemmin puolin, toisin kuin perinteisessä kartiohammaspyöräparissa. (Airila ym. 1985.) Kuvassa 4.4 nähdään hypoidivaihteen periaate.



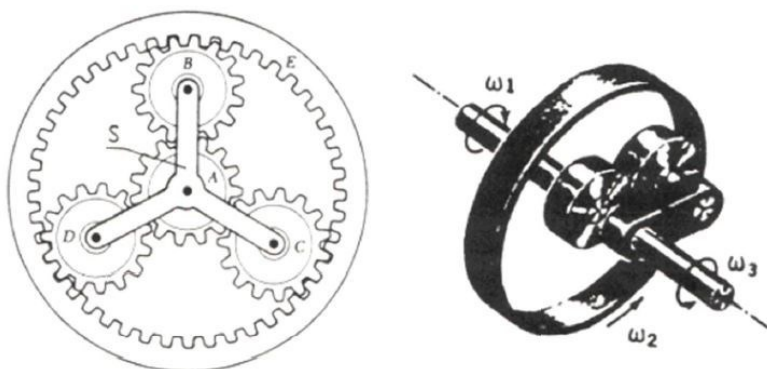
Kuva 4.4: Esimerkkejä hypoidivaihteen periaateratkaisuista. Vasemmalla on kaarihampainen hammaspyöräpari ja oikealla on vinohampainen hammaspyöräpari. (Airila ym. 1985.)

Toisin kuin lieriö- ja kartiovaihteissa, planeettavaihteissa kaikki hammaspyörät eivät ole kiinteästi omalla akselillaan. Osa pyöristä pyörii oman akselinsa suhteen ja kiertää pitkin kehäpyörää keskiakselin ympäri. Planeettavaihteella saadaan aikaan monia välityssuhdemahdollisuuksia kitkakytkimien ja jarrujen avulla, ja välityssuhteen muuttaminen eli vaihteen vaihtaminen voidaan suorittaa vetoa keskeyttämättä. Vaihteet kykenevät siirtämään kokonsa nähden suuria tehoja, johtuen kuorman tasaisesta jakaantumisesta useaan hammaskosketukseen. Planeettavaihte on hyötysuhteeltaan hyvä eikä se myöskään aiheuta laakerivoimia ulkopuolelleen. (Adler & Haapaniemi, 1993.)

Tämän lisäksi on olemassa myös perusvaihteita eli lepoplaneettavaihteita, joissa planeettapyörät eivät kierrä, mutta ne ovat jakautuneet tasaisesti aurinkopyörän ympärille. Lepoplaneettavaihteen rakenne voi olla joko hammas- tai kitkapyörillä varustettu vaihte, ja se mahdollistaa saavuttamaan planeettavaihteen edut ilman pyörivistä planeettapyörästä muodostu-

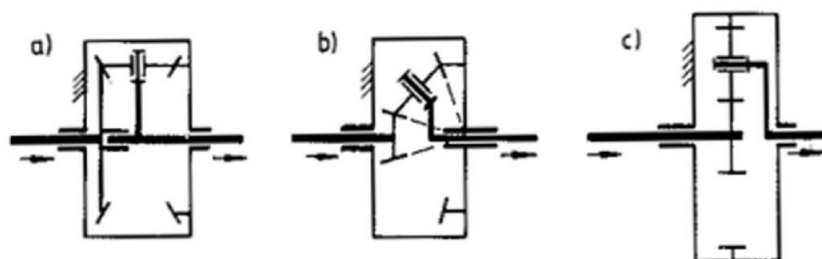
via haittoja. Planeettapyörien kiertäessä aurinkopyörää, planeettaliike aiheuttaa hyrrämomentteja ja keskipakovoimia. Tästä syystä johtuen suuret planeettavaihteet, joilla on suuri pyörimisnopeus, ovat aina lepoplaneettavaihteita. (Airila ym. 1985.)

Lieriöplaneettavaihteen perusmuoto koostuu aurinkopyörästä (A), planeettapyöristä (B, C, D), kehäpyörästä (E) sekä kannatinakselista (S). Kuvassa 4.5 kuvataan lieriöplaneettavaihteen perusmuodon rakennetta. Kehäpyörässä hammastus on sisäpuolinen toisin kuin muissa hammaspyörissä. Perusvaihteessa eli lepoplaneettavaihteessa kannatinakseli on kiinteä, jolloin sen kulmanopeus ω_3 on nolla. Alennus- ja ylennysvaihteissa puolestaan kannatinakseli pyörii ja kehäpyörä pysyy paikallaan, jolloin kehäpyörän kulmanopeus ω_2 on nolla. (Airila ym. 1985.) Yhdestä lieriöplaneettapyörästä on mahdollista saada kuusi eri välityssuhdetta, joista kaksi ovat kierrosnopeutta alentavia, kaksi kierrosnopeutta kasvattavia ja kaksi välitystä, jotka saavat aikaan suunnanmuutoksen. Välityssuhteita muutetaan vaihtamalla vaihteen osien eli aurinkopyörän, planeettapyörien ja kehäpyörän rooleja. Yksi osa on käytävä, toinen käytetty ja kolmas lukittu. Näitä kombinaatioita muuttamalla saadaan aikaan eri välityssuhteita. (Adler & Haapaniemi, 1993.)



Kuva 4.5: Lieriöplaneettavaihteen perusrakenne (Airila ym. 1985).

Planeettavaihteet voidaan jakaa kolmeen perusmuotoon: lieriöplaneettavaihteisiin sekä kartiopyöräplaneettavaihteisiin, joissa planeettapyörät ovat joko kohtisuorassa tai kulmassa keskusakseliin nähden. Esimerkki kohtisuorassa olevasta kartioplanettavaihteesta nähdään kuvassa 4.6 a), joka on tunnettu muun muassa auton tasauspyörästä käytettävästä vaihteratkaisusta. Esimerkki kulmassa olevasta kartioplanettavaihteesta nähdään kuvassa 4.6 b), jota käytetään muun muassa kitkapyörästäissä. Lieriöplaneettavaihteet ovat kuitenkin kaikista käytetyimpiä, yksinkertainen esimerkki kyseisestä vaihteesta on esitetty kuvassa 4.6 c). Poikkeuksellisesti planeettavaihteissa voidaan käyttää myös kierukka- ja ruuvipyörävälityksiä. (Airila ym. 1985.)

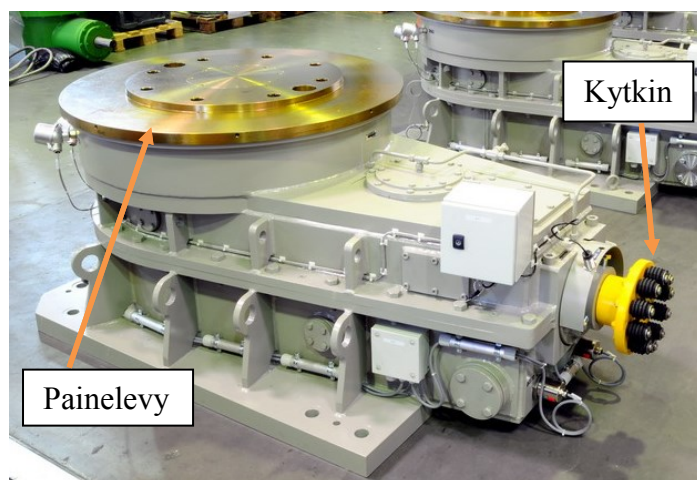


Kuva 4.6: Planeettavaihteiden perusmuodot (Airila ym. 1985).

4.3 Moniportaiset vaihteistot

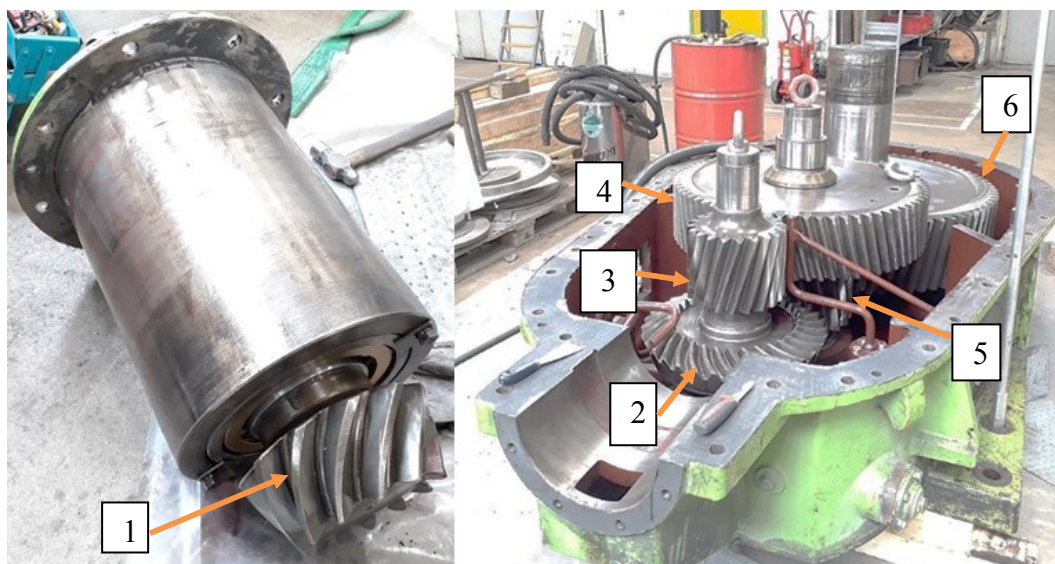
Moniportaisessa vaihteistossa on useampi yksiportainen hammaspyörävälitys. Moniportaisien vaihteistoissa käyttö on lisääntynyt vuosien saatossa, kun on tullut tarve saada korkeanopeuksisia vaihteistoja pieneen tilaan. Moniportaisessa vaihteistossa voi olla myös useampi ulostuloakseli. Vaihteistojen suunnittelussa on otettava huomioon portaiden lukumäärä, välityssuhteet, käytettävissä oleva tila ja vaihteiston suurin sallittu massa sekä muut suunnitteluvaatimukset. Lisäksi ongelmia voi aiheuttaa hammaspyörien ja akseleiden sijoittaminen käytettävissä olevaan tilaan eli vaihteistokoteloon. Vaihteiston käyttöön soveltuva laakerointi on tärkeää, jotta se pystyy kantamaan vaihteiston käytöstä aiheutuvat kuormitusvoimat. Moniportaisia vaihteistoja suunniteltaessa olisi suotavaa käyttää yksittäisillä portailla pienempiä välityssuhteita kuin kyseisen yksiportaisen hammaspyörävälityksen suurin suositeltu välityssuhde on. (Chong ym. 2002.) Moniportaiset vaihteistot voidaan valmistaa käyttämällä lieriöhammasvaihteita tai planeettavaihteita, ja niihin voidaan yhdistellä myös kartiohammasvaihteita. Tällaisia yhdistelmiä kutsutaan kartiolieriö- ja kartioplaneeettapyörä-vaihteistoiksi.

Kartiolieriöpyörävaihteistossa yhdistyvät kartio- ja lieriöhammasvaihde, kuvassa 4.7 on esimerkki David Brown Santasalon valmistamasta vaihteistosta. Kartiohammaspyöräparin kalliiden valmistuskustannusten vuoksi, se yleensä valitaan kartiolieriöpyörävaihteistoissa pienimmäksi eli ensimmäiseksi portaaksi. Kartiolieriöpyörävaihteistoa käytetään tilanteissa, joissa vaaditaan suuri välityssuhde ja akselit eivät ole samansuuntaisia. Usein valintaan vaikuttaa myös rajallinen tilankäyttö. (Airila ym. 1985.)



Kuva 4.7: David Brown Santasalo Oy kartiolieriöpyörävaihteisto (David Brown Santasalo Oy, 2017a).

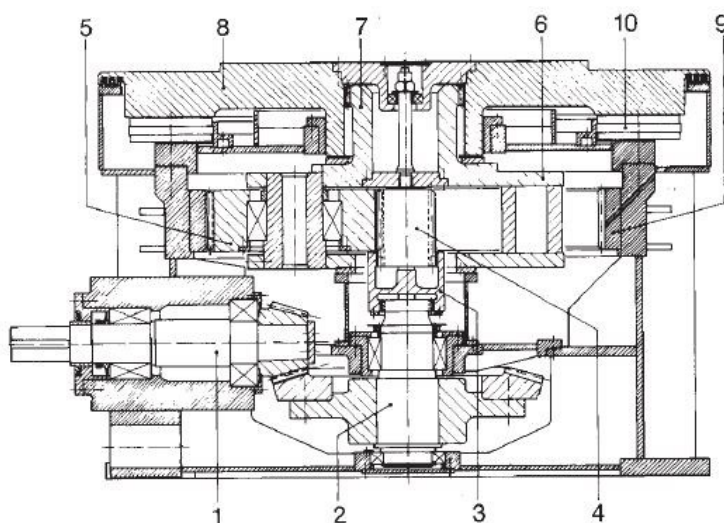
Salmisaari B-voimalaitoksen hiilimyllyjen voimansiirtona toimivat kartiolieriöpyörävaihteistot (Koskinen, 2017). Yksi voimalaitoksen vaihteista oli huolettavana ja kuvassa 4.8 nähdään purettu vaihteisto. Vaihteistossa on kolmiportainen hammaspyörävälitys, jossa on yksi kartiohammasvaihde ja kaksiportainen lieriöhammasvaihde. Sähkömoottorin teho tuodaan kytkimen kautta kulmahammasvaihteen ensiöakselille (1), josta se välittyy kehäpyörän (2) kautta ensimmäisen väliakselin lieriöhammaspyörään (3). Ensimmäiseltä väliakselilta teho välittyy toisen väliakselin isoon lieriöhammaspyörään (4), josta alempi pieni lieriöhammaspyörä (5) välittää tehon pääakselin lieriöhammaspyörän (6) kautta pääakselille. Pääakseli on kiinnitettynä painelevyyn, joka välittää tehon myllyn jauhinmaljan kautta alajauhinrenkaaseen. Tarkemmin vaihteiston rakennetta voi tarkastella konepiirustuksesta, joka löytyy liitteestä 1.



Kuva 4.8: Salmisaari B hiihimyllyn purettu vaihteisto.

Kartioplaneettapyörävaihteistossa puolestaan yhdistyvät kartiohammasvaihde- ja planeettavaihte. Kartioplaneettapyörävaihteistoa käytetään kartiolieriöpyörävaihteiston tavoin tilanteissa, joissa akselit eivät ole samansuuntaisia ja tarvitaan suuri välityssuhde. Kartioplaneettapyörävaihteisto on rakenteeltaan kompakti ja mahtuu näin ollen pienempään petiin, mutta usein korkeudeltaan suurempi kuin kartiolieriöpyörävaihteisto. Planeettavaihteen avulla tehon siirto voidaan jakaa usealla planeettapyörälle, joka tekee vaihteistosta kevyemmän ja hiljaisemmän kuin kartiolieriöpyörävaihteisto. (Elecon Engineering Company Ltd, 2017.)

Kuvassa 4.9. on leikkauskuva vaihteistosta. Teho tuodaan kulmahammasvaihteen ensiöakselille (1), josta se välittyy kehäpyörän (2) kautta vaihteiston pystyakselille. Kytkin (3) yhdistää pystyakselin alaosaan ja planeettavaihteen aurinkopyörän (4). Vääntömomentin tasainen jakautuminen planeettapyörille varmistetaan pyöreillä rullalaakereilla varustettujen planeettapyörien ja vapaasti säätyvän aurinkopyörän avulla. Kannatinakseli (6,7) on mallista riippuen joko tuettu laakerilla tai ei. Kannatinakselin kautta teho välittyy painelevyyn (8), joka kiinnitetään myllyn jauhinpöytään. Planeettavaihteen kehäpyörä (9) on lukittuna koteloon, eikä täten pyöri. (Elecon Engineering Company Ltd, 2017.)



Kuva 4.9: Leikkauskuva kartioplaneettapyörävaihteistosta (Elecon Engineering Company Ltd, 2017).

4.4 Laakerointi

Laakerien pääasiallisena tehtävänä on ohjata ja tukea pyöriviä akseleita ja edestakaisin liikkuvia koneenosia kuten esimerkiksi luisteja. Laakerit voidaan jakaa kahteen kategoriaan kuormitusvoimien suunnan perusteella, aksiaali- ja säteislaakereihin. Tukivoimien vaikutuksessa akselin suuntaisesti tarvitaan aksiaalilaakeri, ja kun kuormitusvoimat kohdistuvat kohtisuoraan akselia vastaan, tarvitaan säteislaakeri. (Björk ym. 2014.)

Laakerit jaetaan rakenteensa perusteella vierintä- ja liukulaakereihin. Vierintälaakereita käytetään kohteissa, joissa laakerin on pystyttävä kantamaan joko pelkät säteittäisvoimat tai säteittäisvoimien lisäksi myös aksiaalista kuormaa. Perinteinen kuulalaakeri on nähtävissä kuvassa 4.10. Liukulaakeri pystyy kantamaan ainoastaan sen pintaan kohti suoraan kohdistuvia kuormitusvoimia. (Björk ym. 2014.)



Kuva 4.10: Perinteinen kuulalaakeri (RS Components Ltd, 2017).

Oikean laakerointitavan valinta on erityisen tärkeää, jotta suunniteltava laite soveltuu kokonsa ja ominaisuuksiensa puolesta käytön mukaisiin olosuhteisiin, ottaen huomioon mahdolliset ympäristö- ja meluvaatimukset sekä vaivattoman kunnossapidon. Laakereita valittaessa on otettava huomioon niihin kohdistuvat kuormitusvoimat ja rakenteen värähtelyt, sekä käyttölämpötila, jotta saadaan valittua oikeanlainen voitelumenetelmä. Laakereilla saattaa olla myös erityisiä tarkkuusvaatimuksia. Laakerointitavat jaetaan viiteen eri tyyppiin (Björk ym. 2014.):

- Voitelemattomina toimivat laakerit
- Itsevoitelevat laakerit
- Vierintälaakerit
- Hydrodynaamiset laakerit
- Hydrostaattiset laakerit.

Voitelemattomina toimivat laakerit ovat rakenteeltaan liukulaakereita, joissa käytetään tavallisesti materiaalina kestopuuvia. Kestopuuvista valmistettujen laakerien yhteydessä voidaan käyttää myös voitelua. Itsevoitelevat laakerit valmistetaan tavallisesti metallista, ja niiden pinta on tunnettu huokoisuudestaan. Voiteluaine tunkeutuu huokoiseen pintaan, jota kutsutaan metallimatriisiksi, ja tekee siitä liukkaan. Metallimatriisi valmistetaan yleensä sintrastusta pronssi- tai rautajauheesta. Vierintälaakereiden toiminta perustuu vierintäelimiin, joita ovat kuulat, kartiot, rullat ja tynnyrimäiset sylinterit. Liukulaakereissa kuormankantavana elimenä toimii ainoastaan voiteluainekalvo liukupintojen välissä. Hydrodynaamiset laakerit ovat liukulaakereita, joissa voiteluaine pumpataan laakeriin ja kuormankantavana elimenä toimiva paine saadaan aikaan laakerin liikkeen vaikutuksesta. Esimerkki hydrodynaamisesta laakeroinnista nähdään kuvassa 4.11. Hydrostaattiset laakerit ovat niin ikään liukulaakereita, joissa laakerin ja liikkuvan koneen osan väliin muodostetaan voiteluainekalvo ulkopuolisen ylipaineen avulla. (Björk ym. 2014.)



Kuva 4.11: Hydrodynaamiset segmenttilaakerit (Elecon Engineering Company Ltd, 2017).

Jauhatuksessa käytettävissä vaihteistoissa käytetään useita eri laakerointitapoja akselien rooleista ja vaihteiston koosta riippuen. Akseleiden laakerointi on määrättyyn kokoon saakka rullalaakeri, ja isomman kokoluokan vaihteistoissa pääakselin laakeroinnissa käytetään sidosliukulaakereita. (Claudius Peters GmbH, 1985b.) Jauhatuksesta aiheutuvaa aksiaalista kuormitusta sekä jauhinosen painon kannattelua varten käytetään kahta laakerointitapaa, segmenttilaakerointia ja kartiorullalaakerointia. Segmenttilaakerit sijoitetaan vaihteiston yläosaan ja ovat tyypiltään hydrodynaamisia laakereita, tällaista painelaakerointia käytetään Salmisaari B-voimalaitoksen hiilimyllyjen vaihteistoissa. Vaihtoehtoisesti pääakselin aksiaaliset kuormitusvoimat voidaan kohdistaa akselin alapäähän kartiorullalaakerille. Segmenttilaakerien käyttämiseen liittyy tietyntyylisiä ongelmia, kuten liukupinnan kuivuminen ja öljykalvon riittämättömyys vaihteiston uudelleen käynnistyttyä yhteydessä. Tämä aiheuttaa ennen aikaista kulumista ja mahdollisia murtumia liukulaakerin pinnassa. Kartiorullalaakerin käyttö vaihteiston alaosassa saattaa aiheuttaa nurjahdusriskin pääakseliin, sillä akselin on koko pituudeltaan kannettava siihen kohdistuvat aksiaaliset voimat. (Luukko, 2017.)

4.5 Vaihteistojen voitelu

Voitelun päätehtävänä on liikkuvien koneenosien, kuten laakerien ja hammaspyörien, kitkan vähentäminen ja kulumisen hidastaminen. Tavallisesti laakereita ja hammaspyöriä jäähdytetään voitelun avulla. Voitelulla ehkäistään myös epäpuhtauksien pääsy voideltaviin kohteisiin ja suojataan koneenosia korroosiolta. (David Brown Santasalo Oy, 2017b.) Voiteluaine voi olla koostumukseltaan kiinteä, nestemäinen tai kaasu. Kiinteäksi voiteluaineeksi luokitellaan yleensä rasvat, ja nestemäiseksi öljyt. Kun voiteluaineena on kaasu, puhutaan kaasulaakereista. (Björk ym. 2014.)

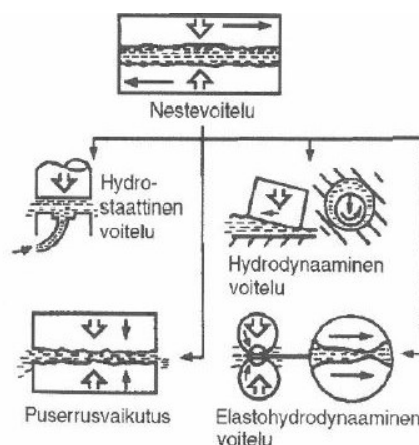
Teollisuusvaihteistojen voiteluaineena käytetään pääsääntöisesti öljyä. Riittävä öljykalvon paksuus on riippuvainen muun muassa hampaan pintapaineesta, kehänopeudesta sekä öljyn viskositeetista. Jatkuvan voitelun takaama ehjä voitelukalvo on erittäin tärkeää, sillä toistuvasti rikkoutuva öljykalvo saattaa aiheuttaa vaurioita hammaspyörässä. Kullekin vaihteistolle on määritetty voiteluöljyn viskositeettia ja määrää koskevat tiedot. (David Brown Santasalo Oy, 2017b.)

Vaihteistojen voitelumenetelmän valinta on oleellinen osa laitteen suunnittelua, sillä oikean voitelutavan ja asianmukaisten voiteluaineiden avulla saavutetaan paras mahdollinen käyt-

tövalmius korkealuokkaiselle vaihteistolle. Tällä tavoin varmistetaan vaihteelle pisin mahdollinen käyttöikä ja suurin toimintavarmuus. (Claudius Peters GmbH, 1985b.) Vaihteistojen voitelumenetelmät voidaan jakaa neljään kategoriaan: kylpy-, roiske-, rasva- ja painevoiteluun (David Brown Santasalo Oy, 2017b).

Kylpyvoitelu soveltuu matalanopeuksisille vaihteistoille, joissa hammaspyörien kehänopeudet ovat alhaisia. Kylpyvoitelussa koneen osat sanan mukaisesti kylpevät öljyssä, sillä hammaskosketus sekä laakerit ovat öljyn peitossa. Roiskevoitelussa koneen osat ovat vain osittain upotettuna öljyyn. Öljypinnan on ulotuttava alimman koneen osan, esimerkiksi hammaspyörän, keskikohdan alapuolelle, jotta pyöriessään kyseinen hammaspyörä tuo öljyä mukanaan ylöspäin roiskien sitä muihin hammaspyöriin. Laakerit saavat voitelunsa roiskuvasta öljystä. Roiskevoitelua käytetään suhteellisen hitaasti pyörivien hammaspyörien voitelussa. Rasvavoitelua käytetään laakereiden ja tiivisteiden voitelussa, mikäli vaihteiston laakerointi sitä vaatii. Vierintälaakereissa käytetään yleensä rasvavoitelua. Painevoitelussa voiteluöljy paineistetaan ja kuljetetaan suoraan voideltaviin koneenosiin kytkemällä vaihteiston öljyputkisto keskusvoitelujärjestelmään tai erilliseen öljypumppuun. Painevoitelujärjestelmä voidaan vaihteiston käyttöolosuhteiden, valvonnan ja jäähdytystarpeen mukaan varustaa ilma- tai vesitoimisella öljynjäähdyttimellä. (Björk ym. 2014, David Brown Santasalo Oy 2017b.) Korkeanopeuksiset vaihteistot tarvitsevat aina painevoitelun välttyäkseen voiteluöljyn keskipakoisvaikutuksilta (Childs, 2013).

Teollisuusvaihteistoissa käytettävä voitelumekanismi on nestevoitelu, jossa liikkuvien koneenosien liukupinnat pyritään erottamaan toisistaan voiteluainekalvon avulla. Nestevoitelumekanismit voidaan jaotella kolmeen kategoriaan: hydrostaattiseen, hydrodynaamiseen ja elastohydrodynaamiseen voiteluun. Nestevoitelumekanismien jaottelu nähdään kuvassa 4.12.



Kuva 4.12: Nestevoitelumekanismien jaottelu (Björk ym. 2014).

Hydrostaattinen voitelu perustuu liukupintojen välissä olevaan voiteluainetaskuun, johon pumpataan voiteluainetta, esimerkiksi öljyä. Öljyn hydrostaattinen paine muodostaa öljykalvon, joka erottaa liukupinnat toisistaan. Laakerin pinnassa olevan kitka on hyvin pieni. Vaikka kitkasta aiheutuvaan tehohäviöön lisätään vielä öljypumpun tehontarve, kokonaisuudessa kitkateho on pieni. (Björk ym. 2014.)

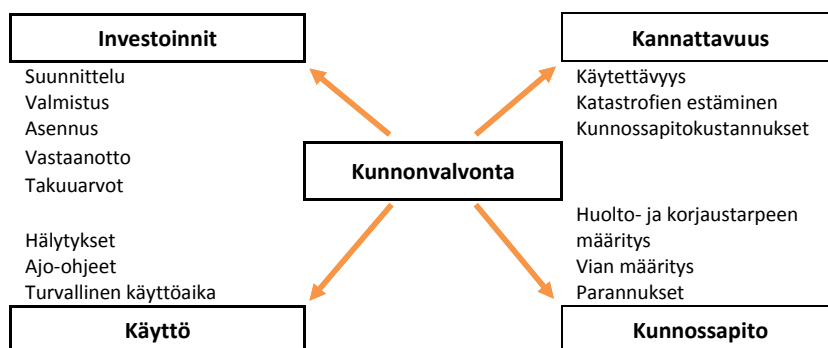
Hydrodynaaminen voitelu perustuu liukupintojen välissä olevaan voiteluainekalvoon ja pyörimisliikkeellä aikaan saatavaan hydrodynaamiseen paineeseen. Kalvon ylläpitämiseksi liu-

kupinnalla vaaditaan jatkuva liike, toisin kuin hydrostaattisessa laakerissa, jossa pelkkä öljypumpun tuottama paine riittää pitämään liukupinnat irti toisistaan. Kuormankantava paine saadaan aikaan kahdella tavalla. Ensimmäinen tapa on johdattaa voiteluaineena toimiva neste tai kaasu kiilamaiseen rakoon, jonka rajapinnat liikkuvat tangentiaalisesti toisiinsa nähden. Toisessa tavassa voiteluaine tiivistyy ja tulee ulos pintojen välistä niiden kosketuskohdassa, kun pinnat lähestyvät toisiaan. (Björk ym. 2014.)

Kun koneen osat altistuvat suurille kuormitusvoimille niissä tapahtuu muodonmuutoksia eivätkä ne enää pysy jäykkinä kosketuskohdissa. Kuormituksen aiheuttama korkea paine nostaa voiteluaineen viskositeetin tasoa reilusti, jolloin voiteluaine ei pääse tiivistymään ja tulemaan ulos kosketuskohdasta. Voiteluaine alkaa tällöin käyttäytyä kiinteän aineen tavoin. Pintojen kimmoiset muodonmuutokset ja voiteluaineen viskositeetin muutos ovat tunnusmerkkejä elastohydrodynaamiselle voitelutilanteelle, joka esiintyy yleensä korkean kuormituksen alaisissa pistemäisissä ja viivamaisissa kosketuksissa. (Björk ym. 2014.)

4.6 Kunnonvalvonta

Kunnonvalvonnalla on suuri merkitys yrityksen eri toimintoihin. Kunnonvalvonta on kunnossapidon osa-alue, jonka avulla tuotetaan voimalaitoksen investointien, kunnossapidon sekä käytön kannalta oleellisia tietoja. Kunnonvalvonta mahdollistaa suunnitelmallisen kunnossapidon, suunnittelemattomien seisokkien vähentämisen ja seisokkiaikojen paremman hyödyntämisen, sekä takaa koneelle pidemmän kestoian. Tehokkaalla kunnonvalvonnalla voidaan merkittävästi parantaa yrityksen kannattavuutta ja tuottavuuden kasvua. Kunnonvalvonnan tavoitteena on ajoittaa kunnossapitotyöt niihin ajankohtiin, kun koneiden kunto edellyttää huoltoa. (Nohynek & Lumme, 2004.) Kunnonvalvonnan vaikutusalueet ja niiden sisältöä on kuvattu kuvassa 4.13.



Kuva 4.13: Kunnonvalvonnan vaikutusalueet ja niiden sisältö (Nohynek & Lumme, 2004).

Perinteistä kunnonvalvontaa suoritettiin pääsääntöisesti aistihavaintojen avulla, muun muassa käyttämällä puukeppiä laakereiden kuunteluun, tunnustelemalla käsien tai jalkojen avulla koneen tärinää sekä koneenosien lämpöä. Lopputuotteen laatu oli myös hyvä mittari koneen kunnon arvioinnissa. Perinteiset menetelmät ovat edelleen arvokkaita kunnonvalvontamenetelmiä, vaikka niitä korvaamaan on kehitetty mittaavia kunnonvalvontamenetelmiä. Tänä päivänä tuotantolaitoksia rakennettaessa kiinnitetään enemmän huomiota ainoastaan kriittisten eli tarpeellisten laitteiden investoimiseen, ja käytetään vähemmän varalla olevia laitteita. Tämä lisää kriittisyysluokitusta laitoksen laitteissa, jolloin yhdenkin laitteen vikaantuminen saattaa olla haitallista tuotannon kannalta. Laitosten seisokit ovat kallistuneet vuosien saatossa, kun tuotantomäärät ovat kohonneet ylöspäin. Laitteiden teknisten ominaisuuksien muuttuminen, kuten pyörimisnopeuden kasvu saattaa vaikuttaa kunnonvalvonnan

lisääntyneisiin tarpeisiin. Laitteiden rakenteet ovat nykyään kevyempiä ja tarkemmin mitoitettuja, jonka vuoksi rakenteiden värinätasojen mittaaminen on tärkeämpää kuin ennen. Nykypäivän tuotantoprosesseja säädellään enemmän, jolloin laitteen kuormitukset saattavat vaihdella paljonkin eri säätöarvoilla, joka vaikuttaa niiden värinä käyttäytymiseen. Perinteinen aistihavaintojen perusteella toteutettava kunnonvalvonta on vähentynyt vuosien saatossa henkilöstömäärien optimoinnin myötä, ja perinteisen kunnonvalvonnan avulla ei saada tunnuslukuja laitteista samalla tavoin kuin mittaavilla kunnonvalvontamenetelmillä. Prosessidataa keräilevien kunnonvalvontalaitteiden kehittyminen on madaltanut kynnystä ottaa käyttöön kyseinen järjestelmä. Datan yhdistäminen kunnonvalvontamittauksiin on oleellista, koska prosessin muutokset vaikuttavat laitteiden värähtelykäyttäytymiseen. Lisäksi mahdollisen epämiellyttävän työskentely-ympäristön meluhaitat sekä vaarat ovat lisänneet kiinnostusta kunnonvalvontajärjestelmiin. (Kivi 2017, Nohynek & Lumme 2004.)

Tärkeimpiin kunnonvalvontajärjestelmässä käytettyihin mittausmenetelmiin kuuluu värähtely-, lämpötila- ja taloudellisuusmittaukset, sekä virta- ja kulumishiukkasanalyysi. Yleisimmin käytetty kunnonvalvonnan mittausmenetelmä on värähtelymittaus. Värähtelymittauksia käytetään kunnonvalvonnan lisäksi käytönvalvonnassa ja vikaselvityksissä. Oikealla tavalla kohdistettua värähtelymittausta pidetään yleisesti ottaen parhaimpana kunnonvalvonnan mittausmenetelmänä, mutta mikäli sitä käytetään väärin, sen käyttö tuhlaa aikaa ja resursseja. Värähtelymittausmenetelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen kategoriaan (Nohynek & Lumme, 2004.):

1. Yksinkertaiset menetelmät laitteiden yleistärinän valvontaan ja vierintälaakereiden kunnonvalvontaan
2. Monimutkaiset menetelmät laitteiden värinän yksityiskohtaiseen valvontaan ja laakereiden kunnonvalvontaan.

Yksinkertaisissa menetelmissä käytetään kahta mittalaitetta, tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää samaa mittalaitetta, mikäli siitä löytyy selkeästi kaksi toisistaan poikkeavaa mittaussuuretta. Ensimmäisellä mittalaitteella mitataan laitteen kokonaistärinä käyttäen tavallisesti taajuusaluetta 10–1000 Hz, jonka avulla selvitetään laitteen akselin pyörimiseen liittyviä vikoja, kuten epätasapaino, liitosten löysyys sekä linjausvirheet. Toinen mittalaite mittaa korkeataajuisia värähtelyä, tyypillisesti 2000 Hz, jonka avulla selvitetään vierintälaakereiden kunto. Korkeataajuisia värähtelyä voidaan havaita, mikäli laakereiden voiteluainekalvo on puutteellinen tai laakeri pääsee vioittumaan. Yksinkertaisessa kunnonvalvonnassa saatetaan käyttää harvoin myös ultraäänilaitteita, joiden avulla voidaan laakerivikojen lisäksi paikallistaa mahdolliset kaasui- tai nestevuodot. Nykyään kaikissa analysointilaitteissa ovat pääsääntöisesti riittävät ominaisuudet suorittaa mittauksia eri taajuuskaistoilla, jonka vuoksi ei tarvita enää kahta erillistä mittalaitetta. (Kivi 2017, Nohynek & Lumme 2004.)

Mikäli kunnonvalvonnan alaisena olevissa laitteissa on erillisiä akseleita, jotka pyörivät eri nopeuksilla, kuten vaihteistoissa, pitää kunnonvalvontamittauksissa ja mittausdatan analysoinnissa ottaa huomioon kunkin mittapisteen ominaisuudet sekä vaatimukset. Yksinkertaiset menetelmät ovat liian epätarkkoja vaihteistojen kaltaisissa laitteissa, koska yksinkertaisen menetelmän mittauksessa havaittavien vikojen lisäksi, korkea värinä taso voi johtua epätasapainosta toisella akselilla, rakenteen resonanssista, huonosta alusta-kiinnityksestä tai pumpun kavitaatiosta. (Kivi 2017, Nohynek & Lumme 2004.)

5 Vaihteistokotelot

Vaihteistokotelo toimii hammasvaihteen runkona. Koteloita valmistetaan joko valamalla tai hitsaamalla. Valmistusmenetelmän valintaan vaikuttavat tuotteiden volyymit. Valumallin takaisinmaksu aika suhteessa volyymiin ja tuotteen kannattavuuteen on merkittävä tekijä menetelmän valinnassa. (Kauppinen, 2017.) Tässä luvussa syvennytään valetun ja hitsatun kotelon suunnitteluun sekä valmistukseen, ja perehdytään koteloiden korjausmenetelmiin.

5.1 Kotelon merkitys ja tehtävä hammasvaihteessa

Hammasvaihteen kotelon tarkoitus on pitää vaihteiston akselit niille tarkoitetuilla paikoilla, jotta hammaskosketus toteutuu suunnitellusti, ja vääntömomentti saadaan siirrettyä ensiöakselilta toisioakselille asianmukaisesti. Kotelon pitää olla riittävän jäykkä, jotta hammaskosketuksista aiheutuvat voimat eivät aiheuta kotelossa muodonmuutoksia tai ylimääräisiä kuormituksia laakereille. Myös ulkoiset kuormitukset aiheuttavat voimia kotelon rakenteisiin, ja niiden arvioiminen saattaa olla vaikeaa varsinkin kun kyseessä on tuotekatalogin mukainen standardikotelo. Standardikoteloiden suunnittelu vaatii täten suuren varmuuskertoimen, jotta ne kestävät satunnaisten käyttökohteiden olosuhteet. Mittatilaustyönä tehtävissä koteloissa, ulkoiset kuormat pystytään arvioimaan tarkemmin käyttökohteen perusteella, jolloin varmuuskerroin pysyy pienempänä. Sisäisten kuormitusten osuus on kuitenkin moninkertainen suhteessa ulkoisten kuormitusten osuuteen. Kotelon jäykkyyteen voidaan vaikuttaa merkittävästi kotelon muotoilulla ja materiaalin kimmokertoimella. Vaihteen välittämä vääntömomentti on otettava huomioon kotelon kiinnitysten suunnittelussa. Vääntömomentti aiheuttaa tukireaktion kotelon kiinnitysten ja ympäristön välille. Tällöin kotelo joutuu kestämään vääntömomentin aiheuttaman kuormituksen. (Niemi 2008, Kauppinen 2017.)

Kotelon suunnittelussa tulisi ottaa huomioon, että hammasvaihteen käyttö aiheuttaa hammaskosketuksesta johtuvia värähtelyjä sekä melua, jotka kotelon tulisi pystyä vaimentamaan niin hyvin kuin mahdollista. Tällöin kotelon materiaalin värähtelyvaimennusominaisuuksien merkitys kasvaa. Valurauta on näiltä ominaisuuksiltaan parempi kuin levy- tai valuteräs, jolloin tämä puoltaa valuraudan paremmuutta vaihteistokoteloiden materiaalina merkittävästi. Kotelon tarkoituksena on myös suojata hammasvaihdetta ympäristöltä, ja se on osa hammasvaihteen voitelujärjestelmää, jossa öljy varastoidaan kotelon sisään. Kotelon jakotason tulee olla öljytiivis, ja lisäksi hitsatussa kotelossa hitsisaumojen pitää olla öljytiiviitä. Kotelo toimii myös lämmönsiirtimenä, joka siirtää hukkalämpöä ympäristöön. Tämä ominaisuus täytyy huomioida erityisesti silloin, kun vaihteistossa ei ole painevoitelua vaan käytetään öljykylpyvoitelua. Kotelossa ei aina ole jakotasoa, se voidaan suunnitella myös umpinaiseksi koteloksi. (Niemi 2008.)

5.2 Valaminen valmistusmenetelmänä

Valaminen valmistusmenetelmänä on nopein ja energiatehokkain tapa valmistaa tuotteita metallista. Valetut kappaleet voivat vaihdella massaltaan yhdestä grammasta satoihin tonneihin. Valaminen on tehokas tapa toteuttaa suunnittelijan ja muotoilijan toivomukset, säilyttäen todella hyvän muoto- ja mittatarkkuuden. Valukappaleen ainevahvuudet voidaan optimoida paikallisesti lujuusteknisten vaatimusten mukaan. Valetut rakenteet ovat tunnettuja hyvästä värähtelyn vaimennuskyvystä ja melun vähentämisestä. Erityisesti suomugrafiittivalurautoilla on hyvät värähtelyominaisuudet. Valukappaleita voidaan valmistaa lähes kaikista metalleista ja niiden seoksista. Valumateriaaleilla on mahdollista saavuttaa erinomaiset

tribologiset ominaisuudet ja sen vuoksi valamista käytetäänkin usein kulutusosien valmistusmenetelmänä. Valukappale valmistetaan lähes valmiin tuotteen mittoihin. Tämä ansiosta valamisella saavutetaan merkittävät materiaalisäästöt, kun turha lastuava työ jätetään pois. Yhteen valukappaleeseen on mahdollista integroida monia osia ja toimintoja, jolloin asennustarve sekä kustannukset pienenevät. Valaminen on tyypillinen valmistusmenetelmä sarjatuotannossa, sillä suurella sarjakoolla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä valmistuskustannuksissa. (Vuorinen ym. 2000.)

Valamiseen ja valumateriaaleihin liittyy vahvoja ennakkoluuloja. Valukappaletta saatetaan pitää raskaampana kuin vastaavaan käyttöön suunniteltua hitsattua rakennetta, vaikka todellisuudessa tilanne on toinen. Valukappaleen vapaampi muotoilu ja oikea valumateriaali takaavat sen, että valukappale on yleensä se kevein. Vapaamman muotoilun johdosta, valukappaleen seinävahvuuksia voidaan muokata jouhevasti lisäten materiaalia niihin kohtiin, mitkä joutuvat lujuusteknisesti kovimman kuormituksen alaisiksi. Vastapainoksi materiaalia voidaan poistaa semmoisista kohdista, joissa sitä tarvitaan vähemmän. Näin ollen säästetään materiaalikustannuksissa ja saavutetaan kevyt, mutta luja valukappale. Tietynlaisia rakenteita on kuitenkin edullisempi valmistaa hitsaamalla. Toisaalta eri valmistus- ja liittämistapojen yhdistäminen, kuten hitsaamisen ja valamisen, saattaa joissain tapauksissa olla edullisin vaihtoehto. (Niemi 2008, Vuorinen ym. 2000.)

Jokainen valmistettava valukappale tarvitsee muotin ja valumallin. Kuvassa 5.1 nähdään puusta valmistettu valumalli, joka sijoitetaan hiekkamuottiin kaavausta varten. Hiekkamuotti koostuu kaavausalustasta ja -kehyksestä, joka täytetään hiekalla. Syöttökanavistot rakennetaan irrallisista osista mallin läheisyyteen tai kaiverretaan valmiiksi kaavattuun muottiin. Valumateriaali sulatetaan uunissa, jonka jälkeen se siirretään syöttöjärjestelmän avulla muottionteloihin sulan syöttökanavistoja pitkin. Jähmettynyt valukappale poistetaan muotista, jonka jälkeen valukappale on valmiina jälkikäsittelyä ja kuljetusta varten. (Meskanen & Höök 2015, Niemi 2008.)



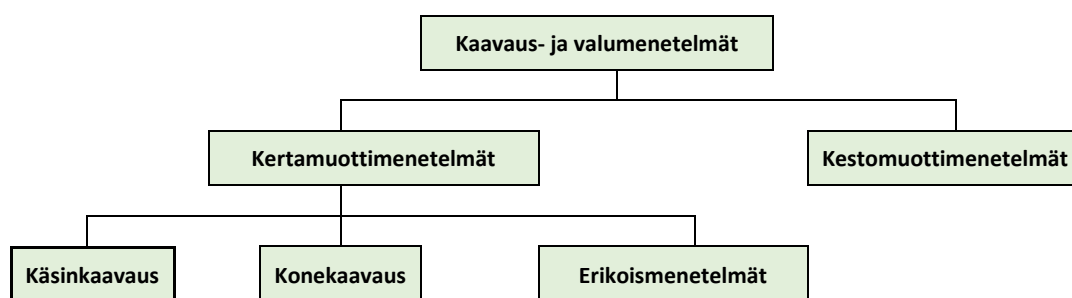
Kuva 5.1: Puinen irtomalli, joka on jaettu jakopinnan kohdalta kahteen osaan. Vihreän nuolen osoittamien tappien avulla mallipuoliskot saadaan yhdistettyä. Punaisen nuolen osoittama ohjauslementti takaa, että ala- ja ylämuotti ovat oikeassa linjassa kaavauksen jälkeenkin. (Meskanen & Höök, 2015.)

Valamisessa käytetään erilaisia valumenetelmiä, jotka jaetaan valumuotin käyttökertojen perusteella kerta- ja kestopuotintimenetelmiin. Kertavalumuoteilla tarkoitetaan valun jälkeen hajotettavaa muotia, joka valmistetaan eli kaavataan tyypillisesti hiekasta, kipsistä tai ke-

raamista. Kertavalumuottien kaavaus tarvitsee aina valumallin, joka on mahdollista valmistaa metallista, muovista, puusta tai vahasta. Valumallin valmistuskustannukset ja sen kestävyys kaavauskertoihin nähden riippuvat mallin materiaalista. Metallista valmistettavan mallin kustannukset ovat korkeat, mutta siitä on mahdollista kaavata yli 50 000 valumuottia. Epoksihartsista valmistettuja malleja voidaan käyttää yli 10 000 kertaa. Näitä muovisia valumalleja voidaan valmistaa helposti uudelleen, mikäli mallinegatiivit säilytetään. Puusta valmistetut valumallit ovat kustannuksiltaan edullisia verrattuna muihin materiaaleihin. Korkeatasoisista puumalleista on mahdollista kaavata 1000 valumuottia. Valumalleja valmistetaan myös vahasta, mutta niitä voidaan käyttää vain kerran. (Vuorinen ym. 2000.)

Kestomuottimenetelmissä muottien valmistukseen käytetään pääsääntöisesti metalleja, mutta myös keraamiset ja grafiitista tehdyt kestomuotit ovat mahdollisia. Kestomuottimenetelmää käytetään ainoastaan sarjatuotannossa. Kestomuottimenetelmin valmistetuilla valukomponenteilla on parempi mittatarkkuus kuin hiekkamuoteilla valmistetuissa valukappaleissa. Metallimuoteilla valettaessa sula valumateriaali jähmettyy nopeammin, jonka seurauksena valukappaleet ovat mekaanisilta ominaisuuksiltaan parempia ja niiden mikrorakenne on hienojakoisempi. Valumateriaalilla on vaikutus muotin kestävyys, ja korkeassa lämpötilassa muotin kestoikä on lyhempi. Muotin kestoikään vaikuttavat myös muotin kunnossapito, käytetty valumenetelmä sekä valukappaleen muoto. On olemassa myös puolikes-
tomuotteja, joissa muotin metallisella pääosalla valetaan useita valukappaleita, mutta jokaista valua varten uusitaan muottiontelon pintakerros tai sen osia. (Vuorinen ym. 2000.)

Kaavausmenetelmät voidaan jaotella esimerkiksi kaavaustekniikan, mallitekniikan tai valukappaleen painon ja koon mukaan. Lisäksi kaavausmenetelmän valintaan vaikuttavat valumateriaali ja valukappaleen sarjasuus. (Vuorinen ym. 2000.) Hiilimyllyjen vaihteistokotelot liikkuvat siinä kokoluokassa, että niiden valmistuksessa käytetään käsinkaavausta. Kuvassa 5.2 on eriteltynä kertamuottimenetelmiin kuuluvat kaavausmenetelmät.



Kuva 5.2: Valumenetelmät ja kertamuottimenetelmään kuuluvat kaavausmenetelmät (Autere ym. 1986).

Käsinkaavaus on vanhin muottien valmistustapa ja sitä käytetään pääsääntöisesti suurien valukappaleiden valmistuksessa. Käsinkaavaamalla valmistettavat muotit ovat joko yksittäiskappaleita tai lyhyitä sarjoja. Työvaiheet tehdään nimensä mukaisesti käsin ja mekaanisia apuvälineitä, kuten hiekkasinkoja käyttäen. Muotti kaavataan käyttäen irtomallia tai mallinetta. Valukappaleen onttojen rakenteiden muotoilemista varten muottiin sisään sijoitetaan keernoja. Suurimmat valukappaleet valmistetaan lattia- eli permantokaavauksena valimon valukuopassa. Käsinkaavauksessa käytetään yleensä kylmänä kovettuvia hartsi- ja vesilasi-
hiekkoja. (Vuorinen ym. 2000.)

Konekaavaus toteutetaan siihen käyttöön tarkoitettujen kaavauskoneiden avulla. Konekaavausta käytetään pienten ja keskikokoisten sarjaluontoisesti valmistettavien valukappa-

leiden kaavaamiseen, joiden tuotantomäärät ovat suurempia kuin käsinkaavauksessa. Kertamuotteja voidaan valmistaa myös erinäisillä erikoismenetelmillä, muun muassa kuorimuotikaavauksella ja mallittoman valun menetelmällä. (Vuorinen ym. 2000.)

Nykypäivänä valukappaleiden valmistuksessa käytetään tietokoneavusteisia suunnittelu- ja tuotantotekniikoita. Valukappaleen 3D-mallin avulla voidaan tarkastella kappaletta lujuusopillisesta näkökulmasta käyttäen FEM-analyysia. Mallin avulla voidaan tehdä simulaatioita valujärjestelyistä sekä ennakoida mahdollisia valuvirheitä. Mallia käytetään myös mallivarusteiden valmistuksessa sekä valukappaleen jälkikäsittelyn koneistuksissa ja työstörajtojen suunnittelussa. (Vuorinen ym. 2000.)

Valumalli on ollut jo pitkään välttämätön osa valumuotin valmistusprosessia, mutta tietokoneavusteisten suunnittelun ja valmistuksen myötä on alettu käyttämään myös mallittoman valun menetelmää, jossa muotti valmistetaan muulla tavoin kuin kaavaamalla. Mallittomassa valussa muotti valmistetaan valukappaleen 3D-mallin mukaisesti. Menetelmät voidaan jakaa kahteen alaryhmään (Meskanen & Höök, 2015.):

- muotin työstäminen
- muotin 3D-tulostaminen.

Muotin työstämismenetelmässä käytetään esikivetettua valuaihiota, joka valmistetaan tavallisesti hiekasta. Valukappaleen muoto koneistetaan kyseiseen valuaihioon robotin avulla, jota ohjataan valukappaleen 3D-malliin tehtyjen työstörajtojen perusteella. Kuvassa 5.3 nähdään kuinka robotti koneistaa valumuottia. Koneistuksen jälkeen aihioista valmistuu valumuotti, joka on valmis tuotantoon. Toinen mallittoman valun menetelmä on valumuotin 3D-tulostaminen, joka on viralliselta nimeltään materiaalia lisäävä valmistustapa (*engl. additive manufacturing*). Valumuottien 3D-tulostus perustuu sideaineen suihkutukseen, jolloin ei tarvita erillistä valuaihiota. Tulostimen pöydälle syötetään valmiiksi hartsilla seostettua hiekkaa ohuina kerroksina. Hiekka kovetetaan tulostuskärjen avulla, joka pudottaa nesteistä sideainetta hiekkapedin päälle halutun muodon mukaisesti. (Gibson ym. 2015, Meskanen & Höök 2015.)

Nämä menetelmät mahdollistavat nopeammin saatavilla olevat koevalut, joiden avulla voidaan varmistua tuotteen vaatimusten täyttymisestä. Näin ollen suunnittelukustannusten määrä vähenee perinteiseen valumallin avulla tapahtuvaan valamiseen verrattuna. Mallittoman valun menetelmä soveltuu parhaiten piensarjojen ja yksittäiskappaleiden valmistukseen, jolloin koko tuotantoprosessi voidaan toteuttaa ilman fyysisiä valumalleja. Tämä laskee myös varastoinnista aiheutuvia kustannuksia. (Niemi, 2008.) Hiekkamuottien 3D-tulostuksesta ei kuitenkaan ole vielä riittävästi kokemusta, jotta sen avulla pystyttäisiin onnistuneesti ja taloudellisesti valmistamaan hyvin hankalia rakenteita, jotka sisältävät kapeita ja pitkiä uurteita. Kun taas nämä rakenteet olisivat kustannusten ja valmistukseen käytettävän ajan puolesta kannattavampaa tulostaa suoraan metallista. (Upadhyay ym. 2017, Meskanen & Höök 2015.)

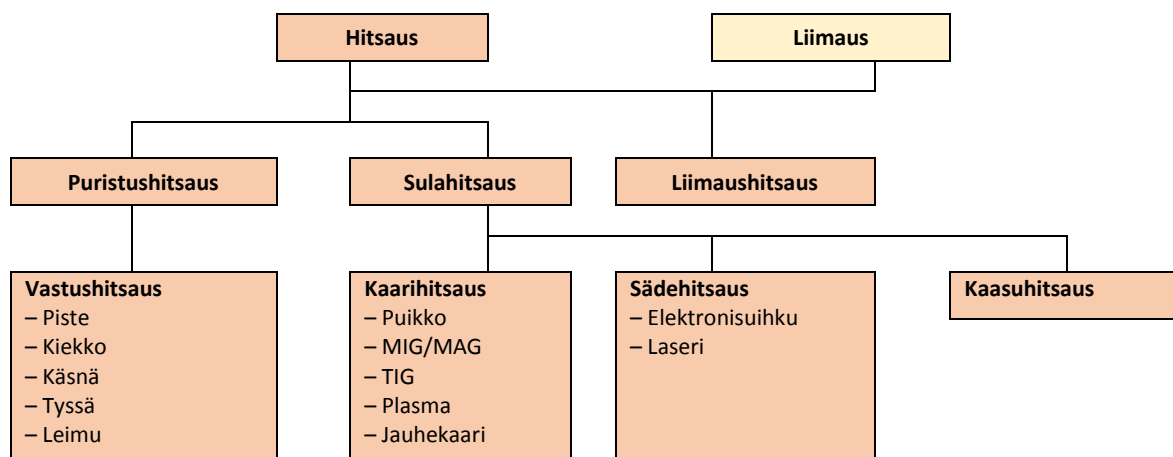


Kuva 5.3: Muotin työstämismenetelmä ilman fyysistä valumallia (Väinölä, 2003).

Valamisen jälkeen valukappaleille tehdään erilaista jälkikäsittelyä, jonka tarve vaihtelee kappaleen rakenteesta, kaavausmenetelmästä sekä valumateriaalista riippuen. Valmiista valukappaleesta poistetaan mahdolliset keernat ja valukkeet, jonka jälkeen valukappaleen pinnat puhdistetaan. Puhdistetun valukappaleen pinnat tasoitetaan ja viimeistellään talttaus- sekä hiomakoneita käyttäen. Valukappaleen taso- ja tiivistyspinnat sekä akselien läpiviennit koneistetaan konepajoilla. Lähtökohtaisesti valukappaleen koneistettavien pintojen kokoa ja määrää pyritään minimoimaan suunnitteluvaiheessa. (Niemi, 2008). Valukappaleelle voidaan tehdä lämpökäsittelyä, jonka tarkoituksena on muuttaa valukappaleen materiaalin ominaisuuksia kuten lujuutta, sitkeyttä ja työstettävyyttä. Valimoissa valukappaleet ainoastaan pohjamaalataan, jotta kappaleella olisi riittävä korroosiosuoja käsittelyn ja kuljetuksen aikana ennen lopullista pintakäsittelyä. Valukappaleiden jälkikäsittelyssä käytetään myös hitsausmenetelmiä valun viimeistelyyn, korjaukseen sekä päälle- ja konstruktiohitsaukseen. Lopuksi valukappale tarkastetaan, jonka jälkeen se voidaan toimittaa asiakkaalle. (Autere ym. 1986, Vuorinen ym. 2000.)

5.3 Hitsaaminen valmistusmenetelmänä

Hitsaus on tärkein ja useimmiten käytetty metallien liittämismenetelmä, mutta sitä on mahdollista käyttää myös muovien ja keraamien liittämiseen. Hitsaus perustuu lämmöstä tai puristuksesta johtuvaan energiaan, joka muodostaa kappaleiden välille jatkuvan yhteyden. Hitsauksessa on mahdollista käyttää lisäainetta, joka on sulamispisteeltään perusainetta vastaava. Hitsausmenetelmiä käytetään useilla teollisuuden aloilla, joiden tyypillisiä kohteita ovat muun muassa metalli- ja teräsrakenteet, autot, prosessi- ja voimalaitosteollisuuden komponentit, maatalous- ja metsäkoneet sekä muut kulkuneuvot. Mekaanisen konepajateollisuuden lisäksi hitsausta käytetään myös sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa, mutta silloin puhutaan yleensä tarkkuushitsauksesta. Hitsausta käytetään myös hyvin usein tuotteiden korjausmenetelmänä, sillä yleensä se on edullisin ja nopein tapa korjata rikkoutunut tuote. (Lukkari, 1997.) Kuvassa 5.4. nähdään hitsausmenetelmät ja niiden jaottelu. Hitsausmenetelmät voidaan jakaa puristus- ja sulahitsaukseen. Lisäksi hitsausta käytetään liimauksen kanssa yhdessä, jolloin ne muodostavat menetelmän liimaushitsaus.



Kuva 5.4: Hitsausmenetelmien ryhmittely (Lukkari, 1997).

Puristushitsauksessa hitsi saadaan aikaan ulkopuolisen energian avulla. Puristushitsausmenetelmät saavat energiansa kuumennetusta työkalusta, nesteestä, kaasusta, valokaaresta, massan liikkeestä tai sähkövirrasta, eivätkä nämä menetelmät tarvitse lisäaineita. Esimerkiksi massan liikkeestä energiansa saa kitkahitsaus, joka on hyvin käytetty hitsausmenetelmä akseliin liittämiseksi. Vastushitsauksessa energia saadaan sähkövirrasta, yleinen esimerkki tästä on pistehitsaus, jota käytetään ohutlevyjen hitsauksessa. (Lukkari, 1997.)

Sulahitsauksessa hitsi muodostetaan sulattamalla liitospinnat yhteen. Sulahitsausmenetelmät saavat energiansa nesteestä, kaasusta, valokaaresta, säteilystä tai sähkövirrasta, ja niiden yhteydessä voidaan käyttää lisäainetta. Valokaarta energianlähteenä käyttävä kaarihitsaus on sulahitsausmenetelmistä laajin ja myös tärkein ryhmä. (Lukkari, 1997.)

Kaarihitsauksessa tarvittavaa lämpöä tuottava valokaari muodostetaan sähköenergian avulla. Valokaarella on korkea energiatiheys ja sen muodostaminen on helppoa, täten valokaari onkin tärkein ja useimmiten käytetty energianlähde hitsauksessa. Valokaarien muodostuminen perustuu kaasussa tapahtuvaan sähköpurkaukseen, joka tapahtuu kaarivälissä olevien sähköisesti varattujen hiukkasten ansiosta. Kaarihitsaukseen kuuluu useita prosesseja, jotka voidaan erottaa toisistaan muun muassa valokaaren näkyvyyden, valokaaren muodostustavan, valokaaren suojaustavan sekä lisäaineen syöttötavan perusteella. Valokaaren näkyvyys jakaa kaarihitsausprosessit kahteen kategoriaan: hitsaus näkyvällä valokaarella ja hitsaus peitetyllä valokaarella. Jauhekaarihitsauksessa valokaari on peitetty ja kaasukaarihitsausmenetelmissä valokaari on näkyvissä. Kaasukaarihitsausmenetelmiin kuuluu: MIG/MAG-, puikko-, plasma-, TIG- sekä täytelankahitsaus. TIG- ja plasmahitsauksessa valokaari muodostuu sulamattoman elektrodin ja hitsattavan kappaleen välille, kun taas muissa kaarihitsausmenetelmissä valokaari muodostuu sulavan elektrodin, eli lisäaineen, ja hitsattavan kappaleen välille. Valokaaren ytimen lämpötila on alimmillaan puikkohitsauksessa, jolloin se on noin 5000–6000 °C, ja korkeimmillaan TIG-hitsauksessa, jolloin se voi olla jopa 30 000 °C. (Lukkari, 1997.) Kuvassa 5.5 on esimerkki TIG-hitsauksesta, jossa menetelmää käytetään putkien hitsauksessa.



Kuva 5.5: Putkien hitsausta TIG-hitsausmenetelmän avulla (Oy Esab, 2017).

Sädehitsauksen prosessit elektronisuihku- ja laserhitsaus käyttävät fokusoitua sädettä energian lähteenä. Elektronisuihkuhitsaus perustuu elektronisuihkuun, jossa suurella nopeudella kulkevat elektronit törmäävät hitsattavaan kappaleeseen muodostaen riittävästi lämpöä materiaalin sulattamista varten. Tavallisesti elektronisuihkuhitsaus tapahtuu tyhjiössä, mutta nykyään menetelmää on mahdollista käyttää myös normaali-ilmanpaineessa. Laserhitsaus perustuu lasersäteen avulla muodostettavaan hitsauslämpöön. Laservalonsäde on sähkömagneettistasäteilyä, ja kaikilla laservalon muodostavat säteet ovat yhdensuuntaisia ja niillä on yhtäläinen aallonpituus. Lasersäde muodostetaan ulkopuolisen energian, sähköisen purkauksen tai vilkkulampun säteilyn avulla, lisäksi on olemassa kaasu- ja kidelaasereita. Kaasulaasereissa laservalo muodostetaan CO₂-kaasussa, ja kidelaasereissa laservalo muodostetaan YAG-kiteessä. (Lukkari, 1997.)

Kaasuhitsauksessa hitsauslämpö tuotetaan polttamalla kaasun ja hapen muodostamaa kaasuseosta. Tavallisesti polttokaasuna käytetään asetyleeniä. Hitsauslämpötila on korkeintaan noin 3000 °C, joka ei ole läheskään yhtä korkea kuin valokaaren ytimen lämpötila kaarihitsauksessa. Hitsausprosessissa käytetään lisäainetta. Kaasuhitsaus ei enää nykypäivänä ole kovin käytetty hitsausmenetelmä, mutta polttokaasulla tuotettua kaasuliekkiä käytetään yleisesti polttoleikkauksessa. Kaasuhitsauksessa, kuten myös polttoleikkauksessakin, käytetään puhdasta lisähappea tehostamaan liekin palamista. (Lukkari, 1997.)

Hitsausprosessissa käytetään erilaisia hitsausaineita. Hitsausaine on termi, joka voidaan jakaa hitsauslisäaineisiin ja hitsausapuväineisiin. Hitsauslisäainetta käytetään kahden kappaleen välisen liitoskohdassa olevan hitsausrillon täyttämiseen. Lisäaine sulaa perusaineen joukkoon muodostaen hitsisauman. Lisäaineita ovat hitsauslangat, hitsauspuikot sekä täytelangat. Hitsauslankoja käytetään MIG/MAG-, jauhekaari-, plasma- ja TIG-hitsauksissa. Täytelankaa käytetään nimensä mukaisesti täytelankahitsauksessa, mutta myös jauhekaarihitsauksen yhteydessä. Hitsausapuväineitä käytetään mahdollistamaan hitsausprosessi tai helpottamaan sitä. Hitsausapuväineitä ovat muun muassa kaarihitsauksessa käytettävät suojakaasut ja jauhekaarihitsauksessa käytettävät hitsausjauheet. Poikkeuksena on puikkohitsaus, jossa hitsauspuikon päällyste toimii hitsausapuväineenä. Päällysteestä irtoaa hitsatessa ainesosia, jotka toimivat suojakaasuna ja muodostavat kuonakerroksen hitsisauman päälle. (Lukkari, 1997.)

5.4 Vaihteistokotelon suunnittelu ja valmistus

Kotelon valmistusmenetelmän valinnassa on otettava huomioon valmistusmateriaali ja materiaalivaatimukset, jotka voidaan jakaa lujuus-, sitkeys- ja kovuusvaatimuksiin. Valukotelolla on suunnittelijan asettamat koko- ja muotovaatimukset. Mittoihin liittyen valetun kotelon suunnittelussa tulee määrittää valmistettavalle osalle sallitut toleranssit ja pinnanlaatu sekä muut laatuvaatimukset. (Vuorinen ym. 2000.) Valmistusmenetelmän valintaan vaikuttavat lisäksi asiakkaiden ja vaihteistovalmistajien mieltymykset sekä suhdannevaihtelut. Kotelon materiaali valitaan vaihteiston käyttötarkoituksen ja kotelon valmistustavan perusteella. (Niemi, 2008.)

Valamista on käytetty vaihteistokoteloiden valmistusmenetelmänä jo vuosia, erityisesti sarjatuotannossa. Tavallisesti pienen ja keskisuuren koko luokan vaihteissa on valetut kotelot, sillä niiden menekki on suurempi. Valumallit suunnitellaan vaihteistokohtaisesti, jolloin pyritään ottamaan huomioon mahdollisten lisävarusteiden kiinnitykset jo tuotekehitysvaiheessa, jotta valumallia voidaan käyttää erilaisissa lisävarustekombinaatioissa. Valumallin tekeminen on kallista, ja tästä johtuen pienemmän menekin omaavat tyypillisesti suurempi kokoiset vaihteistokotelot valmistetaan hitsaamalla. Valumallin hinta koostuu sen valmistukseen kuluva ajasta ja työstä, joihin vaikuttavat merkittävästi mallin materiaali, mitattavuus sekä sarjasuus. Materiaalit ovat edullisempia kertamuottivaluissa käytetyissä valumalleissa, tällaisia ovat puu- ja muovimateriaalit. Kaikista edullisin on polystyreeni, jota käytetään kertamallien materiaalina. Mikäli valmistettavien valukoteloiden lukumäärä alkaa olla kestopuotintekniikoita edellyttävien sarjasuuruuksien tasolla, valumallit ovat tyypillisesti metallisia. (Kauppinen 2017, Niemi, 2008.)

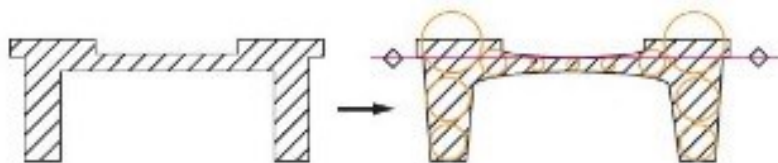
Vaihteistokotelo voidaan suunnitella joko yksiosaiseksi umpikoteloksi tai kaksiosaiseksi jaetuksi koteloksi. Umpikotelo vaatii suurikokoisen keernan, jotta kotelon sisämuodot saadaan valettua suunnitelmien mukaisesti. Keernan monimutkainen kiinnitys saattaa aiheuttaa ongelmia kotelon öljytiivyyden kanssa ja keernahiekan poistaminen pienen umpikotelon sisältä saattaa olla hankalaa. Umpikotelon päällä on iso luukku, josta vaihteiston sisuskalut asennetaan paikoilleen. Tällainen kotelo on rakenteeltaan hyvin jäykkä ja edullinen valmistaa, mutta hammasvaihteen asentaminen ja huoltaminen ovat työlämpiä. Tästä syystä umpinaisia koteloiden käytetään harvoin suuren kokoluokan vaihteistoissa. (Niemi, 2008.) Jaettu kotelo on kustannuksiltaan korkeampi, mutta helpommin huollettava. Jaetussa kotelossa tyypillisesti on ylä- ja alaosa, jotka erotetaan toisistaan vaak- tai pystysuuntaisen jakotason avulla. Jakotaso on koneistettu pinta valukotelon puoliskoissa, joka toimii myös tiivistepintana. Kotelon puoliskot valetaan erillisinä valukappaleina. (Kauppinen, 2017.) Esimerkki jaetusta kotelosta, jossa on pystysuuntainen jakotaso, on nähtävissä kuvassa 5.6.

Vaihteistokoteloiden muotit valmistetaan tavallisesti käsinkaavaamalla puista valumallia käyttäen. Joskus harvoin käytetään myös styroksimalleja. Useimmiten valettu kotelo valmistetaan joko suomugrafiitti- tai pallografiittivaluraudasta. (Kauppinen 2017.) Valettujen koteloiden materiaalina käytetään myös tylppägrafiittivalurautaa ja valettua terästä, mutta nämä ovat hieman harvinaisempia (Niemi, 2008).



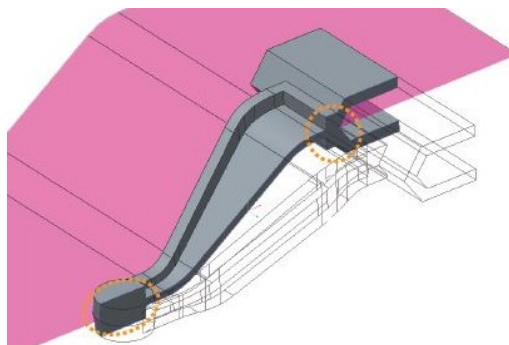
Kuva 5.6: Valettu kotelo, Kumera Compact LGA (Kumera Drives Oy, 2017a).

Valukappaleen suunnittelussa on tärkeää kiinnittää huomioita sulan jähmettymissuuntaan valumuotissa. Jähmettymisen tulisi alkaa kappaleen ohuimmista osista jatkuen tasaisesti kohti kappaleen paksuimpia osia. Oikeaoppisesti suunnitellussa valukappaleessa ei tulisi olla turhan paksuja kohtia eikä vaihtelevia seinämäpaksuuksia, jotta välttyttäisiin turhilta huokosilta. Ideaalisessa valukappaleessa on vain yksi massakeskittymä eli syöttöalue. Valukappaleen muotojen suunnittelussa voidaan käyttää apuna kuvassa 5.7 nähtäviä erikokoisia ympyröitä, jotka ovat pieniä kappaleen ohuimmissa kohdissa ja isoja paksuimmissa kohdissa. (Honkavaara, 2014.)



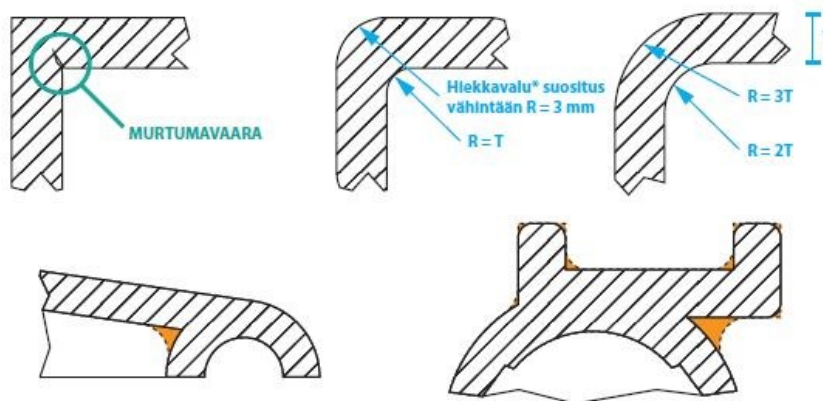
Kuva 5.7: Esimerkki valukappaleen oikeaoppisesta muotoilusta (Honkavaara, 2014).

Valukappaletta suunniteltaessa on mahdollista hyödyntää palkkirakennetta, jolloin kappaleen massaa saadaan kevennettyä ilman, että lujuudesta tarvitsisi tinkiä. Palkkirakenteiden avulla on mahdollista minimoida seinämäpaksuuksien vaihtelut. Kuvassa 5.8 on esimerkki kyseisestä palkkirakenteesta. Kuvassa on ympyröity kappaleen massakeskittymät, joita tulisi käyttää syöttöalueina. Näissä massakeskittymissä imuhuokoisuuden riski on suurempi kuin muussa kappaleessa. Massakeskittymien määrä pitäisi pyrkiä optimoimaan mahdollisimman pieneksi, jonka ansiosta tuotteen valmistamisesta saataisiin kustannustehokkaampaa. (Honkavaara, 2014.)



Kuva 5.8: Esimerkki palkkirakenteen käytöstä valukappaleessa (Honkavaara, 2014).

Valukappaleita suunniteltaessa olisi hyvä käyttää pyöristyksiä. Pyöristyksillä saavutetaan jouhevät ja tyylikkääät muodot sekä taataan sulan tasainen jäähmettyminen valumuottiin. Muotoja suunniteltaessa tulisi välttää teräviä kulmia, sillä niihin syntyy herkästi suurten rasitusten myötä jännityshuippuja. Ne voivat aiheuttaa halkeamia, materiaaliominaisuuksien muutoksia sekä murtumia valukappaleessa. Valukappaleen suunnittelun kannalta optimaalisinta olisi, että kappaleessa käytetyt pyöristyssäteet olisivat mahdollisimman samankokoisia, ja vähintään puolet kappaleen seinämävahvuudesta. Hiekkavaletuissa kappaleissa tulee käyttää suurempia pyöristyksiä kuin tarkkuus- ja kestopuottivaluissa. (Honkavaara, 2014.) Kuvassa 5.9 on esimerkkejä pyöristyksistä.



Kuva 5.9: Esimerkkejä pyöristyksistä valukappaleessa (Honkavaara, 2014).

Yksittäisten vaihteistokoteloiden valmistaminen on edullisempaa toteuttaa hitsaamalla, ellei kyseisen vaihteiston kotelo varten ole olemassa jo valumallia. Hitsattu kotelo on rakenteeltaan jäykempi kuin valettu, mutta vastaavasti sillä on heikompi värähtelyn vaimennuskyky kuin valetulla kotelolla ja on sen vuoksi meluisampi ja resonoi voimakkaammin kuin valettu kotelo määrättyillä taajuuksilla. Valmistuskustannusten minimoimiseksi hitsatun kotelon valmistuksessa käytetään mahdollisimman paljon saman ainevahvuuden omaavia levyjä, palkkeja ja muita perusmuotoisia raaka-ainehioita. Yksinkertaiset raaka-ainehiot takaavat sen, että muodot pysyvät yksinkertaisina. Hitsatussa kotelossa käytetään jäykistysripoja rakenteen jäykkyyden kasvattamiseksi, ja jäähdytysripoja vaihteiston jäähdyttämiseen. Rivat ovat hitsattavia lisäosia, joka tarkoittaa suurempia valmistuskustannuksia. Hitsatun kotelon toimitusaika on lyhempi kuin valetun, johtuen käytettävien materiaaliyhien helposta saatavuudesta ja säästetystä ajasta, joka valetun kotelon tapauksessa kuluisi valumallin tekemiseen. Lisäksi hitsattua kotelo on helpompi muuttaa jälkikäteen, joka onkin yksi merkittävimmistä eduista valettuun nähden. Hitsatun kotelon suunnittelu on yksinkertaista valukoteloon verrattuna. Kotelon valmistukseen ei tarvita välttämättä 3D-mallia, vaan 2D-suunnittelu on riittävä. (Kauppinen 2017, Niemi 2008.)

Hitsatun kotelon osat valmistetaan standardipaksuisista levyistä polttoleikkaamalla. Tällä tavoin säästetään raaka-aineiden käsittelyyn kuluva aikaa, jolloin valmistukseen kuluva aika pääosin koostuu osien paikoilleen asettelusta ja hitsauksesta. Valmistusaika määräytyy osien määrän, koon ja kotelon monimutkaisuuden mukaan. Mikäli samanlaisia koteloita valmistetaan useita, voidaan osat leikata sarjatyönä, ja kotelon valmistuksen työvaiheista tulee rutiininomaisia hitsareille, joka saattaa vähentää valmistukseen kuluva aikaa. Huonona puolena standardiainehien käytössä on rajoitettu muotoilun vapaus, jonka vuoksi hitsatuilla kotelolla on huono paino- ja lujuus-suhde. Hitsattujen vaihteistokoteloiden valmistuksessa käytetään tavallisesti kaarihitsausmenetelmistä tutuksi tullutta MAG-hitsausta. Koteloiden

materiaaleiksi soveltuvat niukkaseosteiset rakenneteräkset. Esimerkkinä hitsattua kotelosta nähdään kuvassa 5.10. (Kauppinen 2017, Niemi 2008.)



Kuva 5.10: Hitsattu kotelo, hakkurin vaihteisto (Kumera Drives Oy, 2017b).

Hitsatessa perusaineen kiderakenne hitsisauman läheisyydessä muuttuu suuren lämpö määrän vaikutuksesta kovemmaksi ja hauraammaksi verrattuna muihin kohtiin perusaineessa. Tästä johtuen hitsattu rakenne murtuu yleensä juuri hitsisauman vierestä. Hitsauslämpö aiheuttaa myös jännityksiä ja muodonmuutoksia kotelossa. Tästä syystä koteloiille tulee tehdä jännityksenpoistohehkusitten, kun kotelo ei tarvitse enää hitsata kokoonpano- eikä korjaamismielessä. Lämpökäsittelyn jälkeen hitsattu kotelo pohjamaalataan, tehdään tarvittavat koneistukset sekä suoritetaan tarkastusmittaukset. Tarkastuksen jälkeen kotelo on valmis toimitettavaksi vaihteiston kokoonpanoon tai asiakkaalle. (Kauppinen 2017, Niemi 2008.)

5.5 Vaihteistokoteloiden korjausmenetelmät

Vaihteistokoteloihin saattaa käytön myötä tulla halkeamia, huokosia, säröjä sekä muita vikakohtia. Ongelmat voivat johtua epätavallisesta kuormituksesta, huonoista perustuksista ja valmistusvirheistä sekä erilaisista ympäristötekijöistä. Tässä luvussa keskitytään erityisesti suomugrafiittivaluraudan korjausmenetelmiin, sillä Salmisaaren B-voimalaitoksen vaihteistokotelot ovat valmistettu kyseisestä materiaalista.

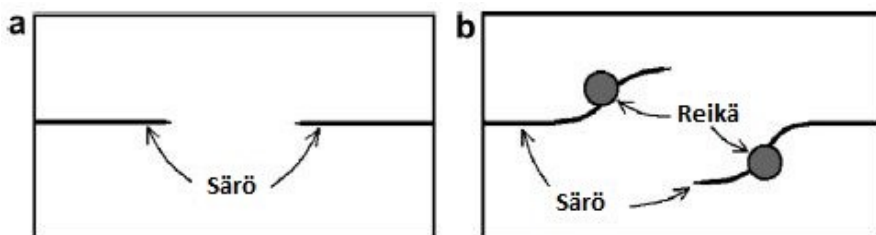
Vaihteistokotelon vaurioiden korjaus riippuu paljolti kotelon materiaalista ja vaurion laadusta. Joitakin valukappaleiden vaurioita on mahdollista korjata sulahitsausmenetelmillä. Lyhyet ja matalat säröt tavallisesti hiotaan pois, eikä niille tehdä suurempia toimenpiteitä. Säröjen ja halkeamien korjaukseen voidaan käyttää sulamenetelmien lisäksi päätyporausta ja niin kutsuttuja kylmiä menetelmiä, kuten tikkaus (*engl. metal stitching*). (Luukko, 2017.)

Sulamenetelmillä tarkoitetaan hitsausmenetelmiä, joita käytetään useimpien valukappaleiden korjaukseen. Valurautojen soveltuvuutta hitsattavaksi voidaan arvioida valurautatyypin perusteella. Niin kutsuttujen valkoisten valurautojen hitsaamista ei suositella. Valkoisissa valuraudoissa ei ole vapaata hiiltä grafiittina, vaan ne ovat rakenteeltaan karbidisia eli ledeburiittisia. Valkoisen valuraudan murtopinta on vaalea, jonka vuoksi sen on saanut nimityksen valkoinen valurauta erotuksena nimitykseen harmaavalurauta. Harmaalla valuraudalla tarkoitetaan suomugrafiittivalurautaa, jonka murtopinta on tumman himmeä. Murtopinnan sävy johtuu grafiittirakennetta pitkin kulkevasta murtumapolusta. Harmaita valurautoja voidaan hitsata rajoitetusti. Harmaitten valurautojen hitsaamista rajoittavat perusaineen korkea

hiilipitoisuus sekä vaatimaton venymä, joka on hyvin tyypillistä monille rautalajeille. (Autere ym. 1986, Meskanen & Niini 2017.)

Hitsaus suoritetaan tavallisesti puikko-, MIG/MAG- tai TIG-hitsauksena. Lisäaineina hitsauksessa käytetään tarkoitukseen soveltuvia erikoispuikkoja ja -lankaa, joka on koostumukseltaan sopiva. Perinteisten sulamenetelmien lisäksi, valurautoja voidaan korjata erikoispulvereiden sularuiskutuksella. Ennen korjausta, korjattava valukappale hiekkapuhalletaan ja vauriokohtien halkeamat poistetaan avartamalla. Kappale esilämmitetään vielä ennen varsinaista korjausta uunissa 200–300 °C lämpötilaan. Korjaustoimenpiteiden jälkeen kappale jäähdytetään hitaasti eristeiden avulla, ja kappaleelle suoritetaan jälkikäsittely sekä särökokeet. (Rauska, 2017.)

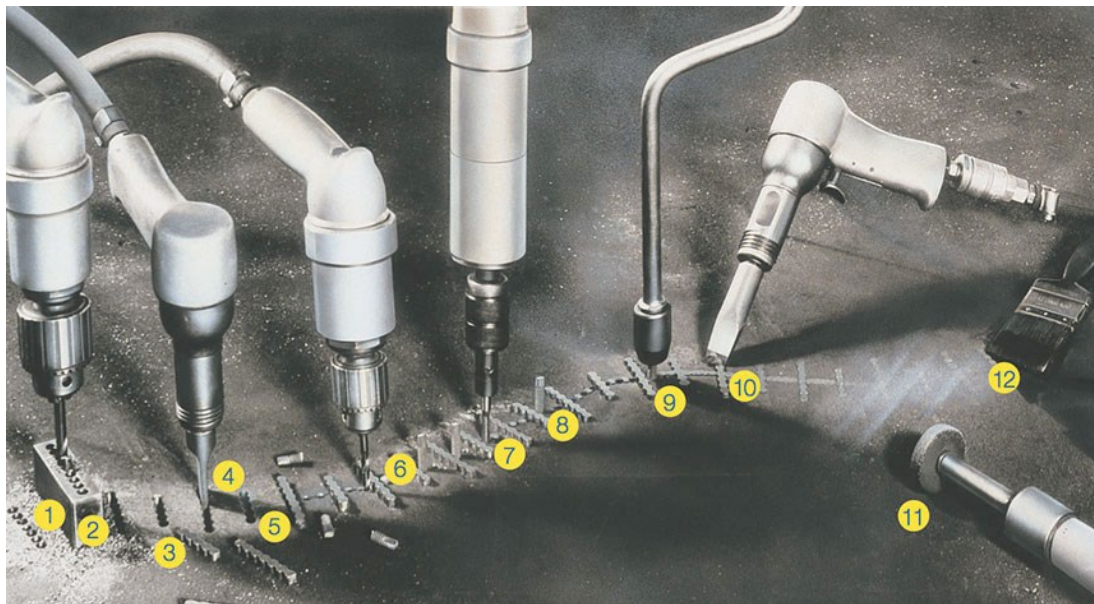
Päätyporauksella tarkoitetaan menetelmää, jota voidaan käyttää, mikäli särö tai halkeama ei ole liian syvä (Luukko, 2017). Vaurioituneessa kappaleessa olevan särön pään (*engl. crack tip*) läheisyyteen voidaan joko porata reikä tai porattuun reikään voidaan lisänä asettaa sovitustappi. Tapin ja reiän väliin muodostuu tiukka sovite, jolloin sovite aiheuttaa puristavia jäännösjännityksiä särön alueella. Tieteellinen tutkimus osoittaa, että poraamalla reikiä särön päiden läheisyyteen ja asettamalla niihin sovitustapit, voidaan tehokkaasti hidastaa särön kasvua sekä estää eri puolilta kappaletta alkaneiden säröjen yhdistymistä vauriokohdassa. Kuvassa 5.11. kuvataan särön etenemissuuntaa ennen ja jälkeen päätyporauksen. A-osassa kuvataan seinämän molemmilta pinnoilta alkaneiden säröjen teoreettista etenemistä. B-osassa kuvataan ennustetta säröjen etenemissuunnan muutoksesta, kun säröjen päiden läheisyyteen porataan reiät. (Makabe ym. 2009.)



Kuva 5.11: Särön eteneminen ennen ja jälkeen päätyporauksen (Makabe ym. 2009).

Vaurioituneita valurakenteita voidaan myös korjata tikkausmenetelmällä. Tikkausmenetelmässä säröjen ja halkeamien puoliskot sidotaan yhteen käyttämällä sidontapaloja (*engl. Metalock Key*), jotka ovat valmistettu hyvin sitkeästä metalliseoksesta. Ennen palojen asettamista, porataan reikiä niiden asennusta varten. Kuvassa 5.12 nähdään tikkauksen eri työvaiheet. Työvaiheessa 1 murtumakohdan molemmat osapuolet asetetaan kohdalleen ja uudelleenlinjataan sekä varmistetaan, että murtumapinnat ovat tiukasti toisissaan kiinni. Vaiheessa 2 reiät porataan ohjaimen avulla ennalta määrättyyn syvyyteen kohtisuoraan särön kulkusuuntaan nähden. Vaiheessa 3 nähtävä sidontapala sovitetaan porattuun koloon pneumaattisen taltan avulla vaiheessa 4. Yksi pala ei kuitenkaan täytä aukkoa, vaan yksittäisiä paloja joudutaan pinoamaan kerroksittain toistensa päälle kunnes viimeinen pala tulee aukosta yli korjattavan kappaleen pinnan, kuten vaiheessa 5 on kuvattu. Sidontapaloja voidaan pitää lähes kiinteänä osana valukappaletta. Vaiheissa 6–9 sidontapalojen väliin porataan reikiä särön suuntaisesti ja reiät tapitetaan. Tapituksessa käytetään ruuvia, joka kierretään reikään. Reiässä ei ole kierteitä, joten ruuvi pureutuu perusaineeseen. Reikien tulee olla hieman limittäin, jotta ruuvit saadaan tiiviisti toisiaan vasten. Kierrelujite ruuvien asennuksen yhteydessä varmistaa, että ruuvit toimivat tiivisteenä ja tukkivat särön. Ruuvia kierretään

reiän sisään kunnes ruuvin kanta leikkautuu irti ruuvista. Vaiheessa 10 pintaan jäävästä leikkautuneesta ruuvinpäädystä ylimääräinen metalli tasataan perusaineen tasalle pneumaattisen taltan avulla. Vaiheessa 11 taltalla tasoitettu pinta hiotaan käsikäyttöisellä hiontalaitteella, ennen valukappaleen pinnan maalaamista. (Metalock Engineering UK Ltd. 2017.) Kyseistä menetelmää käytettiin vaihteistokotelon säröjen korjauksessa, jota käsitellään luvussa 6.5.



Kuva 5.12: Työvaiheet metallikappaleen korjauksessa tikkausmenetelmällä (Metalock Engineering UK Ltd, 2017).

Avohuokosten täyttämiseen metallikappaleissa voidaan käyttää epoksipohjaisia komposiitteja, jotka eivät ruostu ja ne suojaavat korjattavaa metallikomponenttia hyvin erilaisilta kemikaaleilta. Komposiitit ovat täysin koneistettavia tavanomaisia työkaluja käyttämällä ja niitä voidaan käyttää huoneen lämpötilassa. Komposiittikorjaus on niin kutsuttu kylmämenetelmä. (Belzona International Ltd, 2017.) Kyseistä menetelmää käytettiin vaihteistokotelon avohuokosten korjauksessa, jota käsitellään luvussa 6.5.

Hitsattuja vaihteistokoteloita voidaan korjata hitsaamalla, mutta hitsatun kotelon korjaushitsaamisessa on huomioitava hitsauksesta syntyvän lämmön aiheuttamat jännitykset sekä kotelon valmistustoleranssit. (Kauppinen, 2017). Korjaushitsauksen jälkeen kotelo saatetaan joutua koneistamaan uudestaan, jotta mahdolliset rakenteelliset muodonmuutokset saadaan poistettua (Niemi, 2008). Kuten jo luvussa 5.4 mainittiin, hitsatulle kotelolle täytyy tehdä lopuksi jännityksenpoistohehkutus, kun sitä ei enää hitsata.

6 Salmisaari B-voimalaitoksen hiilimyllyt ja vaihteistot

Salmisaaren B-voimalaitoksen K1-kattila saavuttaa täyden tehonsa jo kolmella hiilimyllyllä, jolloin neljäs mylly on niin kutsuttu varamylly. Varamylly mahdollistaa myllyjen käytön aikaisen huoltamisen ja on tukena häiriötilanteissa, jotta välttyttäisiin energianhankinnan lisäkustannuksilta. Energianhankinnan lisäkustannuksilla tarkoitetaan häiriöstä johtuvan energiantuotantovajeen paikkaamista kalliimmalla energiantuotantotavalla, esimerkkinä raskaan polttoöljyn polttaminen K1-kattilassa tukipolttoaineena. Jokaista hiilimyllyä kohden on yksi kartiolieriöpyörävaihteisto sekä niiden lisäksi yksi varavaihteisto. Varavaihteisto mahdollistaa yhden vaihteiston täydellisen irrottamisen hiilimyllystä, jolloin se voidaan toimittaa konepajalle huollettavaksi. Vaihteisto on kytketty hiilimyllyn jauhinmaljaan kiinteällä kytkimellä ja sähkömoottori on kytketty tappikytkimen avulla vaihteistoon (Koskinen, 2017).

Varamyllyn olemassaolo hankaloittaa hiilimyllyjen vikaantumistaajuuden tutkimista, koska yksittäisiä myllypysähdyksiä ei aina raportoida häiriöraportin muodossa. Puutteellisen raportoinnin taustalla on näkemys siitä, kuinka myllyn pysähtymistä ei aina luokitella voimalaitoshäiriöksi. Pääasiassa tämä johtuu siitä, ettei yksittäinen myllypysähdys välttämättä aiheuta energianhankinnan lisäkustannuksia, ja varamyllyn käyttöönottoa ei luokitella häiriötilanteeksi.

Puutteellisen häiriöraportoinnin vuoksi tässä työssä keskityttiin analysoimaan asiantuntijoiden lausuntoja myllyjen ja vaihteistojen käytönaikaisista ongelmista, komponenttien tämän hetkisestä kunnosta sekä kunnossapidosta ja kunnonvalvonnasta. Häiriöraporteista löydettyjä lisähavaintoja käytettiin asiantuntijoiden lausuntojen tukena. Lisäksi tutkittiin hiilimyllyihin ja vaihteisiin kohdistuneita kustannuksia, sekä verrattiin hiilimyllyjen käyttötunteja myllytoimittajan ilmoittamaan kestoiän ennusteeseen. Myllyjen ja vaihteistojen kulumista sekä niissä ilmenneitä vaurioita analysoitiin NDT-tarkastuspöytäkirjojen ja myllyn vaipan vaurioanalyysin avulla. Vaihteistokoteloiden vaurioiden juurisyyn etsimisessä tutkittiin vaihteistopedeille tehtyjä värähtelymittauksia sekä huollon aikaisia tarkastuksia. Vaihteistokotelon 3D-mallille tehtiin valusimulaatio, jossa analysoidaan kotelon muotoja valuteknisestä näkökulmasta ja niiden yhteyttä koteloissa ilmenneisiin vaurioihin. Valusimulaatio tehtiin yhteistyössä Aalto Yliopiston kanssa. Lisäksi työssä selvitettiin erilaisia kytkinvaihtoehtoja vaihteiston ja hiilimyllyn välille, joiden avulla voitaisiin mahdollisesti ehkäistä vaihteistokoteloiden vaurioita.

6.1 Käytön ongelmat

Hiilen herkkä itsesytyvyys aiheuttaa välillä paloja päiväsiiloissa ja hiilimyllyissä. Erityisesti viime vuosien myötä lisääntynyt Kazakstanilaisen hiilen käyttö on lisännyt itsesytyvyyden riskiä (Nieminen, 2017a). Pellettejä jauhettaessa on tärkeää tarkkailla syöttömääriä, sillä sopivalla seoksella puu- ja hiilipölyä saadaan aikaan pölyräjähdysvaara. Liian suuri määrä puuainesta hiilen seassa kasvattaa pölyräjähdysvaaran ja kytöpalon riskiä hiilimyllyissä etenkin tilanteissa, jolloin mylly joudutaan pysäyttämään lastiin. Lastiin pysähtyneen myllyn käynnistyksessä on erityisen tärkeää, että mylly käynnistetään kevennettynä, jotta vaihteiston painelaakeri ei vaurioituisi (Luukko, 2017). Tällöin kytöpaloa pyritään sammuttamaan poistamalla kytevä hiili myllyn rojuluukun kautta sekä käyttämällä sammutushöyryä. Joissain tapauksissa voidaan joutua käyttämään sammutuksessa vettä, joka yleensä kaadetaan jakajan päästä pudotusputkea pitkin hiilimyllyyn. Päiväsiiloissa olevia kytöpaloja sammutetaan niin

ikään sammutushöyryn ja veden avulla. Kastuneesta hiilestä johtuen laitosta voidaan joutua ajamaan poikkeuksellisesti neljällä myllyllä, jotta päästään eroon kosteasta ja huonosti palavasta hiilestä sekä saavutetaan keskusvalvomon pyytämä teho. (Helen Oy 2017a, Koskinen 2017.)

Salmisaaressa käytettävät hiilimyllyjä kutsutaan räjähdysten kestäviksi. Myllyssä tapahtuviin pölyräjähdysiin ei voida kuitenkaan vaikuttaa myllytyypillä, sillä se on täysin olosuhteita ja polttoaineen ominaisuuksista johtuvaa toimintaa. Pölyräjähdykset voivat saada syttymisenergiansa kyöpalosta tai myllyyn päätyneiden metallin palojen kuumenemisestä. Mahdollisten räjähdysistä aiheutuvien vaurioiden ehkäisemiseksi hiilenjakajat ovat varustettu räjähdysluukuilla, jotka aukeavat mikäli myllyssä tapahtuu räjähdys. Luukuista huolimatta räjähdys saattaa aiheuttaa vaurioita hiilimyllyissä ja hiilipölyputkistossa. (Häiriöraportit, Koskinen 2017.) Pölyräjähdysten vaurioiden ehkäisemiseksi hiilimyllyihin on asennettu räjähdysten tukahduttamisjärjestelmät, eli supressiojärjestelmät. Järjestelmä tukahduttaa alkavan räjähdysten laukaisemalla myllyn sisään supressioainetta, joka täyttää myllyn hetkessä. (Nieminen, 2017a.) Myllypaloja voidaan ennalta ehkäistä lopettamalla pelletin polttaminen ennen voimalaitoksen alasajoa, mikäli voimalaitoksen toiminnassa tapahtuu jotain poikkeavaa, jotta laitoksen pysähtyessä myllyihin jäisi turvallisuussyistä mahdollisimman vähän pellettejä (Helen Oy, 2017a).

Suutinrenkaan kulumisen häiritsee kantoilman virtausta ja aiheuttaa ongelmia sen säädöissä sekä pyörteisen virtauksen aikaan saamisessa. Myllyharjat kuluvat, jolloin niiden puhdistustehokkuus heikkenee ja suutinrenkaan alapuoli likaantuu. Jauhinosisien epätasaisella kulumisella on negatiivinen vaikutus hiilen jauhautuvuuteen, kun alajauhinrenkaan pinta muuttuu kuluessaan lainamaiseksi. Hiilen mukana tulevat ei-toivotut metallikappaleet sekä muut jätteet nopeuttavat jauhinosisien kulumista ja saattavat vaurioittaa niitä sekä lisäävät myllyhäiriöitä (Koskinen 2017, Luukko 2017). Metallikappaleiden kulkeutumista hiilen mukana pitäisi pyrkiä estämään tulevaisuudessa (Malkki, 2017a). Jauhatusta häiritsee myös painekehyyksen kiristysvaijerien ajoittainen jumittaminen. Pelletin jauhatusta kasvattaa jauhinosisien rikkoutumisriskiä kuularengasmyllyissä pelkän hiilen jauhatukseen verrattuna. Jauhaantunut pelletti muodostaa patjan alajauhinrenkaan päälle, jolloin kuulat nousevat patjan päälle. Puupölystä muodostunut patja katkeaa ja murtuu herkästi, joka aiheuttaa jauhinkuulan iskeytymisen alajauhinrengasta vasten. Tästä syystä alajauhinrengas tai kuula saattaa haljeta, joka johtaa jauhinosisien ennenaikaiseen vaihtamiseen. Myös aiemmin mainitut kyöpalot saattavat olla haitaksi jauhinrenkaalle ja aiheuttaa halkeilua, varsinkin kun niitä joudutaan sammuttamaan vedellä. Pelletille on tavanomaista kerääntyä kasoiksi alajauhinrenkaalle, jolloin jauhinkuulat joutuvat kapuamaan niiden ylitse. Tämä aiheuttaa kiristysvaijereissa paljon turhaa liikettä ja kasvattaa hetkellisesti alajauhinrenkaaseen kohdistuvaa aksiaalista voimaa. (Huovilainen 2017, Kontro 2017.) Myllyn kuormituspainetta säätelevä hydraulikkajärjestelmä saattaa vikaantua ja aiheuttaa ongelmia jauhatuksessa, alhaisen tai liian korkean öljynpaineen vuoksi (Helen Oy, 2017a).

Häiriöraporteista havaittiin, että myllyn kuormituspainetta säätelevän hydraulikkajärjestelmän ja myllyjen oheislaitteiden vikaantumiset aiheuttivat myllyjen pysähtymisiä. Oheislaitteisiin voidaan lukea myllyilmapuhaltimet ja myllymoottorit sekä vaihteistot. Lisäksi hiilenjakajien häiriöt aiheuttivat myllypysähdyksiä, jolloin syynä oli muun muassa jakajan pysähtyminen sähköisen tai mekaanisen vian, kuten jakajaan kulkeutuneiden vieraiden esineiden vuoksi. (Helen Oy, 2017a).

Vaihteistojen voitelujärjestelmien toiminnassa on ilmennyt liian alhaisesta voiteluöljyn virtausmäärästä johtuvia ongelmia. Tähän ovat vaikuttaneet voiteluöljypumpun häiriöt ja tukkeutuneet öljysuodattimet. Suodattimien tukkeutumiseen on syynä laakereista irtoava valkometalli, tähän palataan puhuttaessa vaihteiston vaurioista luvussa 6.4. Vaihteistokoteloiden vaurioista aiheutuvat öljyvuodot häiritsevät hieman voimalaitoksen käyttöä, mutta eivät ole toistaiseksi olleet mikään merkittävä ongelma vuoto öljyn vähäisen määrän vuoksi. Vaihteistoissa olevat anturit ja mekaaniset kytkimet vikaantuvat toisinaan ja aiheuttavat myllyn pysähdyksiä. Varavaihteiston olemassaolo vähentää vaihteistojen häiriöiden sekä ongelmien aiheuttamia tuotantohäiriöitä, sillä rikkoutunut vaihteisto saadaan nopeasti vaihdettua toimivaan vaihteistoon. (Helen Oy 2017a, Linnamäki 2017, Malkki 2017a.)

6.2 Kunnossapito

Myllyjen huoltoja ja korjauksia ei pääsääntöisesti keskitetä vuosihuollon ajankohtaan vaan myllyjä huolletaan tasaisesti käyttökauden aikana, joskin yksi myllyhuolto saatetaan ajoittaa vuosihuollon ajankohdalle. Salmisaari B-voimalaitoksen varamyly mahdollistaa hyvän huollettavuuden myös käyttökauden aikana ilman kattilatehon alentamista ja energianhankinnan lisäkustannuksia. Myllyhuoltojen välissä tehdään ennakko- ja huoltoja, jotka ovat rakenteeltaan aivan samankaltaisia kuin perinteiset myllyhuollot. Ennakko- ja huolloilla pyritään pienentämään varsinaisten myllyhuoltojen huoltokuormaa sekä seuraamaan myllyjen kulumista. Ennakko- ja huolto kestää noin viikon, ja niitä tulisi tehdä noin 1500 käyttötunnin välein, eli 2–3 kertaa vuodessa, varsinaisten myllyhuoltojen välissä. Normaalin myllyhuollon kesto on niin ikään noin viikko. Ennakko- ja huollon ja myllyhuollon alussa mylly puhdistetaan sisäpuolelta ja kuormitusvaijerit sekä niiden läpiviennit tarkastetaan. Vaijereiden läpivientejä tarkistettaessa, on varmistettava myös esteetön tiivisteilman kulku vaijerin läpivientiputkeen. Myllyn sisäosat tarkastetaan ja kulutusosien, kuten jauhinosien, kulutuspinnoit mitataan sekä mittaukset taulukoidaan. Kulutuksen määrä ilmoitetaan ajan funktiona kuvaajassa, josta voidaan seurata kulumisen kehitystä. Kuluvien osien lisäksi tulee tarkastaa myös myllyn vaipan ja ovien kunto. Varsinaisten myllylle tehtyjen tarkastusten jälkeen on vielä suoritettava vaihteiston ja öljylaitteiden kunnon sekä tiiveyden tarkastus, puhdistus ja kunnostus. Jauhinosia aletaan uusia kun jauhinosien kulumisessa havaitaan poikkeavaisuuksia, jotka kielivät tavanomaista nopeammasta kulumisesta. Mikäli jauhinosien vaihdon lisäksi myllyn rakenteet kaipaavat perusteellisempaa kunnostusta, myllyhuolto kestää pidempään kuin viikon. Perinteinen myllyhuolto ja vaihteiston vaihtaminen kestää noin kaksi viikkoa. Vaihteiston vaihtaminen edellyttää jauhinosien purkamista, kuvassa 6.1 nähdään purkamisessa käytettävä nostoapuväline. (Koskinen 2017, Malkki 2017a.)

Hiilimyllyjen huoltoväliä on harvennettu ja ennakko- ja huoltojen määrää on vähennetty viime vuosina ja jonain vuosina niitä ei ole tehty ollenkaan. Ennakko- ja huolloista luopuminen nähdään erityisesti kuormitusvaijereiden jumittumisena, jolloin vaijerit vetävät jousikiristyskehystä kieroon. Epätasainen kuormitus välittyy jousien kautta painerenkaaseen, joka aiheuttaa eri osissa jauhinrengasta epätavallista kuormitusta ja kulumista. Epätavallinen kuormitus saattaa omalta osaltaan lisätä myös vaihteistoon kohdistuvia kuormituksia. (Linnamäki 2017, Malkki 2017a.) Kuormitusvaijereiden jumittamista on pyritty ehkäisemään L-teräksestä tehtyjen vaijerisuojujen avulla, jotta vaijerit eivät olisi yhtä paljon kosketuksissa hiilipölyn kanssa. Tämän on huomattu vähentävän vaijereiden jumittumista. (Koskinen, 2017.)

Myllyjä varten on tehty kunnossapitosuunnitelmat, joita noudattamalla ongelmien määrä vähenee. Näin ei kuitenkaan tehdä, vaan käytön asettamat rajoitukset myllyjen kunnossapitoon

aiheuttaa poikkeamia kunnossapitoaikatauluissa. Suunniteltuja huoltoja ei päästä suorittamaan ajallaan, jolloin laitoksella tehtävien kunnossapitotöiden määrät eivät ole optimaalisen tasaisia. Tämän vuoksi kunnossapitoasentajien työkuorma kasvaa rajusti juuri sillä hetkellä kun mylly yhtäkkiä vapautuu huoltoon. Tästä aiheutuu yritykselle ylimääräisiä kunnossapitoon suunnattuja henkilöstökustannuksia, eli toisin sanoen kunnossapitokustannukset kasvavat. (Linnamäki 2017, Malkki 2017a)



Kuva 6.1: Hiilimylly 4 huolto tammikuussa 2017 (Kallio, 2017b).

Hiilimyllyjen vaihteistot huolletaan tavallisesti yksi kerrallaan säännöllisin väliajoin määräaikaishuollossa Hanasaaren konepajalla tai ostetaan vaihteistohuolto ulkopuolisena palveluna esimerkiksi vaihteistotoimittajalta. Yksi vaihteisto huolletaan noin joka toinen vuosi, ellei mitään ennen aikaisia ongelmia synny. Huoltoa varten tehdään työsuunnitelma vaihteiston tuotteistusohjeen mukaisesti. Aluksi vaihteiston ulkopinnat pestään ja puhdistetaan öljystä sekä liasta, jonka jälkeen kotelosta lasketaan öljyt ulos. Vaihteisto puretaan kokonaan ja kotelon sisäpuoliset pinna pestään sekä puhdistetaan. Tämän jälkeen kotelon rakenteelle suoritetaan särötarkastukset, mikäli laatikossa on ilmennyt käytön aikana öljyvuotoja. Mahdollisten säröjen korjaamista varten vaihteistokotelo hiekkapuhalletaan. Voitelujärjestelmän toiminta tarkastetaan ja vaihteiston kunto arvioidaan, jonka perusteella tehdään tarpeelliset kunnostustoimenpiteet. Laakerit pääsääntöisesti uusitaan aina huollon yhteydessä, poikkeuksena pääakselin säteislaakerit ja hydrodynaamiset segmenttilaakerit, joista uusitaan vain huonokuntoiset laakerit. Kunnostuksen jälkeen vaihteisto kootaan ja hammaskosketukset tarkastetaan, lopuksi kotelo täytetään öljyllä ja vaihteistolle tehdään tarvittavat korroosionsuojaukset. Tämän jälkeen vaihteisto voidaan luovuttaa takaisin asiakkaalle. (Tahvanainen, 2017.)

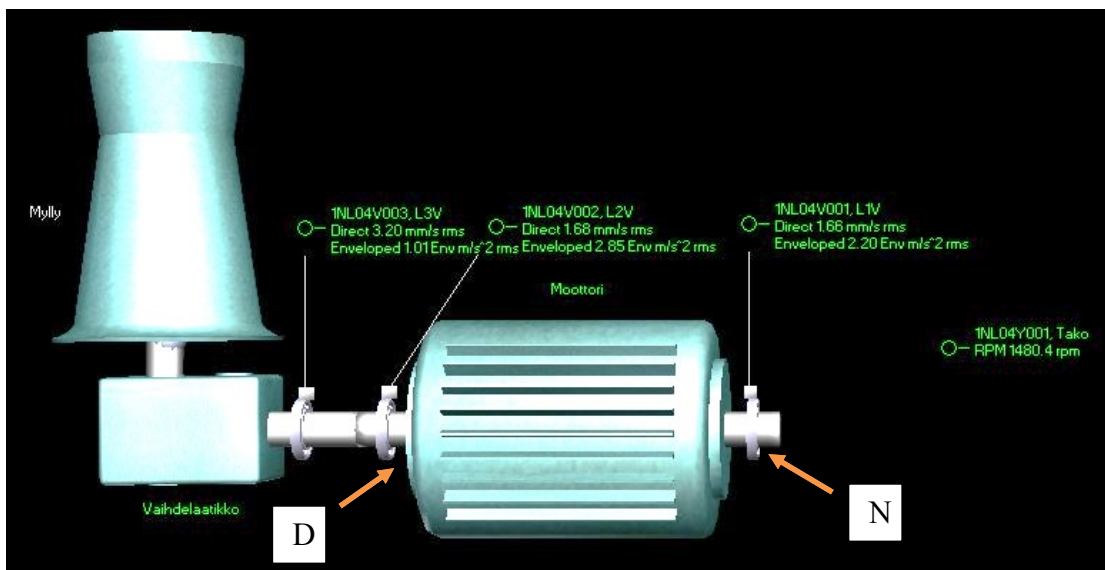
Vikatilanteista johtuvien ongelmien vuoksi vaihteistojen määräaikaishuollon yhteydessä joudutaan usein tekemään lisätyösuunnitelma mahdollisten vaurioiden korjaamiseksi. Pääakselin painelaakerien runsas kuluminen tai vaurioituminen voi johtaa ongelmiin, jossa seg-

menttilaakerien liukupinta on varioitunut ja niiden aluslevy on kulunut. Tästä syystä painelaakerin aluslevy saatetaan joutua valmistamaan uudelleen sekä uusimaan segmenttilaakerit. Mahdolliset vaihteiston öljyvuodot saattavat johtua vaihteistokoteloon muodostuneista säröistä sekä halkeamista, jotka täytyy korjata. Korjaamalla saadaan pysäytettyä etenevä särö tai halkeama, ja täten estettyä vakavimmat vauriot vaihteistossa. (Tahvanainen, 2017.)

6.3 Kunnonvalvonta

Salmisaaren hiilimyllyt ovat kytkettyinä kunnonvalvontajärjestelmään kolmella kiihtyvyysanturilla, jotka sijaitsevat moottorin N- ja D-päässä sekä vaihteiston sisäänmenoakselin laakeroinnin kohdalla. Anturit nähdään kuvassa 6.2. Kiihtyvyyssanturien lisäksi mitataan tahvipulssia vaihteiston ja moottorin välisen kytkimen kohdalla. Edellä mainittujen mittausvälineiden avulla lasketaan kyseisissä kohdissa vaikuttavia värähtelyparametreja ja taulukoidaan saadut tulokset. Taulukoiduista tuloksista on vaivatonta seurata trendiviivan perusteella kuinka värähtelytasot vaihtelevat. Lisäksi suoritetaan aikatasomittauksia FFT-spektrianalysaattorilla. (Kivi, 2017.)

Kiinteässä kunnonvalvontajärjestelmässä on kolme anturia, jolloin osa mittauksista täytyy tehdä paikan päällä. Mittaukset suoritetaan noin neljän viikon välein. Tutkimuksissa mitataan värähtelytasoja moottorin D-pään pysty- sekä aksiaalisuunnassa, vaihteiston väliakselien aksiaalisuunnassa ja pääakselin vaakasuunnassa. Mittauksen suorittava henkilö myös kuuntelee signaalia mittauksen aikana tulosten tulkitsemiseksi. Vaihteiston öljypumpun kunto tarkastetaan myös mittauksen yhteydessä. (Kivi, 2017.)



Kuva 6.2: Hiilimyllyjen kunnonvalvonnassa käytettävät kolme kiinteää kiihtyvyyssanturia (Kivi, 2017).

Vuonna 2004 tehtiin värähtelymittauksia hiilimyllypedeille, joiden avulla haluttiin selvittää petien kuntoa. Erityisenä huomion kohteena oli hiilimyllyn 4 peti, jonka betonissa havaittiin pintahalkeamia. Myllyn perustuksissa olevan I-palkin epäiltiin myös olevan irti betonista, sillä se liikkui hieman betoniin nähden. Ongelmia alettiin tutkia värähtelynopeusmittauksen avulla, jotka suoritettiin käyttämällä FFT-spektrianalysaattoria. (Backholm, 2004.)

Hiilimyllyjen värähtely johtuu pääsääntöisesti jauhinkuulien pystysuuntaisista satunnaisliikkeistä. Värähtely on sen vuoksi kohinaluontoista, joka jakaantuu leveälle taajuuskaistalle. (Backholm, 2004.) Kohinaluontoinen värähtely hankaloittaa vaihteistokotelossa tapahtuvien

värähtelyiden analysointia, jolloin aistienvaarainen arviointi kuuntelemalla toimii paremmin (Kivi, 2017).

Värähtelymittauksen tulokset osoittivat, että halkeamat kahdessa eri osassa tehtyjen betonivalujen välissä vaikuttivat erittäin pinnallisilta ja olivat täten merkityksettömiä. Halkeamien kohdalla ei ilmene taipumista eikä suhteellista liikettä, mutta myllyn 4 vaihteiston alapuolella kulkevat I-palkit ovat osittain irti betonista. Tästä syystä kaikille myllyille tehtiin laajempi teräsosien mittausta. Asiantuntijan mukaan myllyn 4 värähtelytaso erosi selkeästi muista myllyistä, joka johtui palkkien huonommasta kiinnityksestä betoniin. Vastaavasti mylly 1 oli parhaiten kiinni pedissään, koska myllyn 1 pedissä betonin värähtely oli keskimäärin voimakkaampaa kuin myllyillä 2 ja 3. Asiantuntijan mukaan vaihteiston nurkat liikkuvat selvästi enemmän kuin I-palkin yläpinta vaihteiston ulkopuolella jokaisen myllyn kohdalla. (Backholm, 2017.)

Mahdollisimman pian värähtelymittausten jälkeen hiilimyllyn 4 petiongelmia päätettiin korjata. Peti injektointiin kesällä 2005, jonka myötä palkkien kiinnitys parani ja niiden liike väheni betoniin nähden. Värähtelymittauksia tai petien injektointeja ei ole tehty muiden myllyjen pedeilä. (Stolt, 2017.)

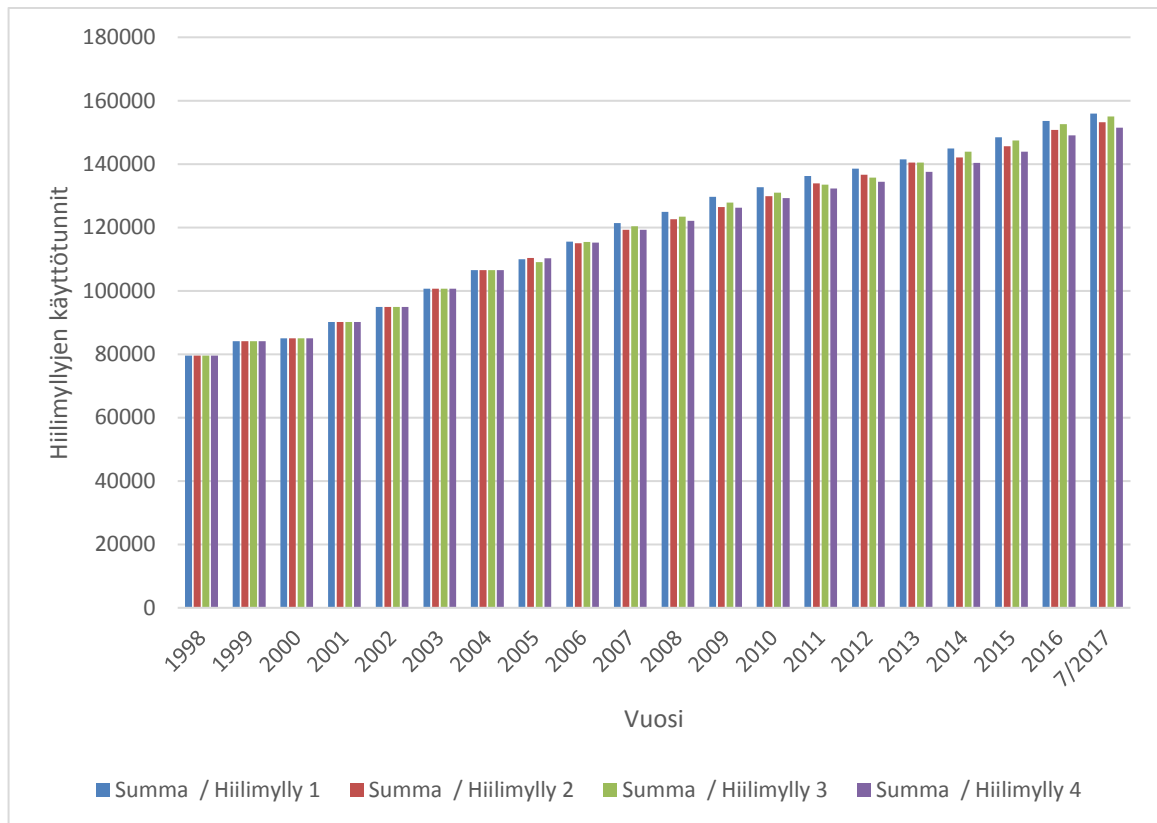
Kesällä 2017 vaihdettiin hiilimyllyn 3 vaihteisto huollettuun vaihteistoon, joka oli huollettu erään vaihteistotoimittajan toimesta. Huollon yhteydessä kotelon pohja oikaistiin. Toimittajan mukaan kotelon halkeaminen oli todennäköisesti seurausta siitä, että osa vaihteiston pohjan kiinnityspinoista oli ollut hieman irti pedistä. Toimittaja piti myös mahdollisena, että peti saattoi antaa hieman periksi. Peti päätettiin tarkastaa ja koneistaa suoraksi tarpeen vaatiessa. (Malkki, 2017b.)

Eräs ulkopuolinen toimija tarkasti myllyn 3 pedin, jonka perusteella peti päätettiin koneistaa. Tarkastuksessa suurin mitattu heitto pedissä oli 1,1 mm. (Linnamäki, 2017.) Tämä ylitti vaihteistotoimittajan antaman asennustarkkuuden reilusti, jossa suurin heitto saa olla maksimissaan 0,125 mm tämän kokoiselle vaihteistolle (Moventas Gears Oy, 2013). Rungas heitto myllyn 3 pedin tasaisuudessa ja lähiaikoina piinanneet vaihteisto-ongelmat antavat aiheita myös muiden petien uusille tarkastuksille sekä mahdollisesti ongelmallisten petien injektointiselle lähitulevaisuudessa (Koskinen 2017, Luukko 2017, Stolt 2017). Asiantuntijan mukaan tämän hetkessä myllyille ja vaihteille suoritettavassa kunnonvalvonnassa käytettävää kiinteää järjestelmää voitaisiin laajentaa yhdellä tai kahdella värähtelymittausanturilla (Kivi, 2017).

6.4 Hiilimyllyjen ja vaihteistojen kunto

Salmisaaren hiilimyllyt ovat alkuperäiset ja ovat olleet käytössä jo vuodesta 1984 lähtien. Myllyjen ja vaihteistojen kuntoa lähdettiin arvioimaan vertailemalla hiilimyllyjen käyttötunteja valmistajan ilmoittamaan arvioon myllyjen kestoikästä. Kuvassa 6.3 on kerätty tietoja hiilimyllyjen käyttötunneista vuodesta 1998 lähtien, jolloin myllyillä oli ajettu keskimäärin noin 79 581 tuntia. Vuosien 1998–2004 käyttötunteja ei ollut mahdollista saada myllykohtaisesti, joten käyttötunnit jouduttiin arvioimaan kaavan 6.1 osoittamalla tavalla. Samoin kesällä 2014 käyttöön otetun uuden automaatiojärjestelmän myötä ajanjakso 07/2014–07/2017 jouduttiin arvioimaan samalla menetelmällä. Myllytoimittajan mukaan myllyjen arvioitu kestoikä on 170 000 tuntia olettaen, että myllyn huolto on asianmukaista (Milewski, 2017).

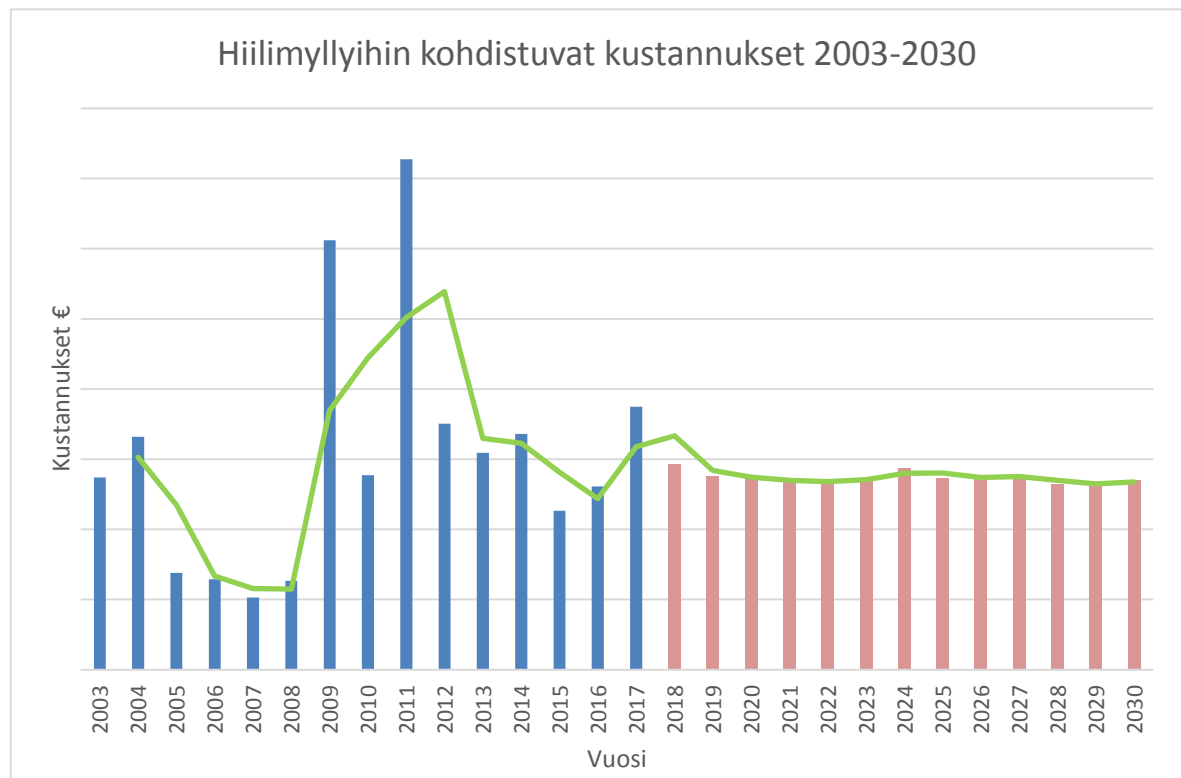
$$\text{Mylyjen käyttötunnit} = \frac{75 \% \cdot \text{Voimalaitoksen käyttötunnit}}{100\%} \quad (6.1)$$



Kuva 6.3: Hiilimyllyjen kokonaiskäyttötunnit ajanjaksolta 1998–7/2017 (Salminen, 2017).

Hiilimyllyihin kohdistuneita kustannuksia kerättiin vajaan 15 vuoden ajanjaksolta alkaen vuodesta 2003 ja päättyen lokakuun loppuun 2017. Kustannukset voidaan jakaa kolmeen kustannusosaan: sisäisiin ja ulkopuolisiin palveluostoihin sekä tarvikkeostoihin (Stolt, 2017). Sisäisillä palveluostoilla tarkoitetaan Helenin sisäisiä palvelukustannuksia, kuten muun muassa asentajien ja suunnittelijoiden palkkakustannuksia. Ulkoisilla palveluostoilla tarkoitetaan Helenin ulkopuolisilta yrityksiltä ostettuja palveluita. Tyypillinen ulkopuolisten palveluiden toimittajia voivat hiilimyllyjen tapauksessa olla esimerkiksi konepajat. Tarvikkeostoilla tarkoitetaan hiilimyllyjen kunnossapitoa ja käyttöä varten hankittuja tarvikkeita ja varaosia, kuten esimerkiksi jauhinosa ja kiristysvaijereita. Kustannusosien prosenttiosuuksia kokonaiskustannuksista ei voida esittää, koska muutamana vuotena ei ole tehty riittävän tarkkaa erittelyä mihin kustannusosaan kustannukset kohdistetaan. Vuosittaiset kokonaiskustannukset vuosilta 2003–2017 ja ennuste vuosien 2018–2030 kustannuksista sekä niiden liukuva keskiarvo ovat nähtävissä kuvassa 6.4. Kuvasta nähdään, etteivät hiilimyllyihin koh-

distuneet kustannukset ole radikaalisti kasvussa. Maltillista kasvua on kuitenkin havaittavissa. Vuosina 2009 ja 2011 on havaittavissa korkeita kustannuksia, jotka johtuvat enimmäkseen jauhinosisien uusimisesta. Lisäksi suutinrenkaan segmentit uusittiin vuonna 2011.



Kuva 6.4: *Hiilimyllyihin kohdistuneet kustannukset vuosina 2003–2017, ja ennuste kustannustasosta tulevana vuosina 2018–2030.*

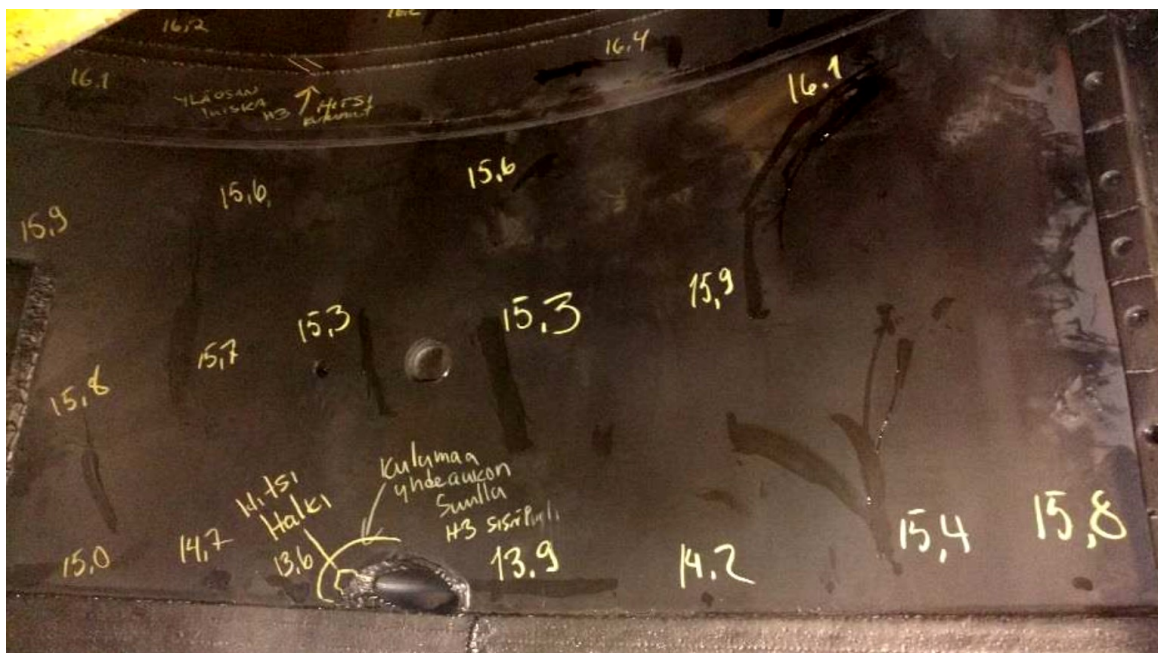
Kuularengasmylly on rakenteeltaan melko yksinkertainen, ja selkeimmin myllyjen kulumisen on havaittavissa jauhinosisien kulumisena. Jauhinosat, kuten myös suutinrenkas sekä myllyharjat, ovat kulutusosia ja ne vaihdetaan aina tarpeen mukaan. Ainoastaan kulutusosia vaihtamalla myllyt eivät kuitenkaan kestä ikuisuuksia, vaan myllyjen teräsrakenteet kuluvat myös. (Koskinen, 2017.)

Hiilimyllyille tehdään NDT-tarkastuksia, joissa tarkastellaan myllyjen rakenteita. Viimeisin tarkastus tehtiin kesäkuussa 2017, jossa havaittiin halkeamia ja kulumista hitsisaumoissa. Myllyn seinämät olivat kuluneet. Seinämien kulumista mitattiin pistokoemaisesti paksuusmittauksia tekemällä. Kuvassa 6.5 nähdään tarkastettu myllyn seinämä. Myös myllyn jousikiristyskehyksen korvakkeissa ja iskupaloissa havaittiin säröjä sekä halkeamia. Liitteessä 2 on nähtävissä lisää kuvia viimeisestä NDT-tarkastuksesta. Samankaltaisia vaurioita ja kulumaa on havaittu myös aiemmissa tarkastuksissa. (Kärnä, 2017.)

Myllyn sisäseinämissä eli vaipassa kulumisen johtuu myllyssä pyörivän hiilipöly-ilma-seoksen aiheuttamasta eroosiokulumisesta. Lisäksi myllyn käytöstä johtuvat värähtelyt aiheuttavat rakenteiden säröilyä sekä halkeilua. (Koskinen, 2017.) Vuonna 2012 yhdestä Hanasaaren B-voimalaitoksen hiilimyllystä tehtiin vaipan vaurioanalyysi, jossa tutkittiin myllyn seinärakenteiden säröytymistä. Analyysin perusteella hiilimyllyn rakenteiden materiaali säröytyy todennäköisimmin väsymisen vuoksi. Hiilimyllyihin kohdistuu voimakkuudeltaan vaihtelevia jännityksiä, jotka ylittävät paikallisesti materiaalin väsymislujuuden. Väsymismurtumia

voidaan ehkäistä materiaalin väsymislujuutta lisäämällä tai jännitysvoimia vähentämällä. Väsymislujuuden voidaan arvioida olevan suoraan verrannollinen teräksen murtolujuuteen. Parempi väsymiskestävyys saavutetaan tällöin käyttämällä lujempaa teräslaatua. (Viuhko, 2012.) Analyysia voidaan soveltaa myös Salmisaaren hiilimyllyihin, sillä mylly on tyypiltään sama ja rakenteiden materiaalina on niin ikään rakenneteräs (Koskinen, 2017).

Asiantuntijoiden mukaan myllyjen säännöllisellä kunnossapidolla ja korjaamisella voidaan varmistua myllyjen hyvästä käytettävyydestä tulevaisuudessa. Kulutusosat kuluvat joka tapauksessa oli kyseessä uusi tai vanha mylly. Myllyn rakenteissa ilmenneet vauriot eivät ole aiheuttaneet suurempaa päänvaivaa ja ovat ainakin toistaiseksi täysin korjattavissa. (Huovilainen 2017, Luotonen 2017, Luukko 2017, Kivi 2017, Kontro 2017, Malkki 2017a, Nieminen 2017b, Viuhko 2017.) Liitteessä 2 on myös lisää kuvia hiilimyllystä NDT-raporteista poimittujen kuvien muodossa.

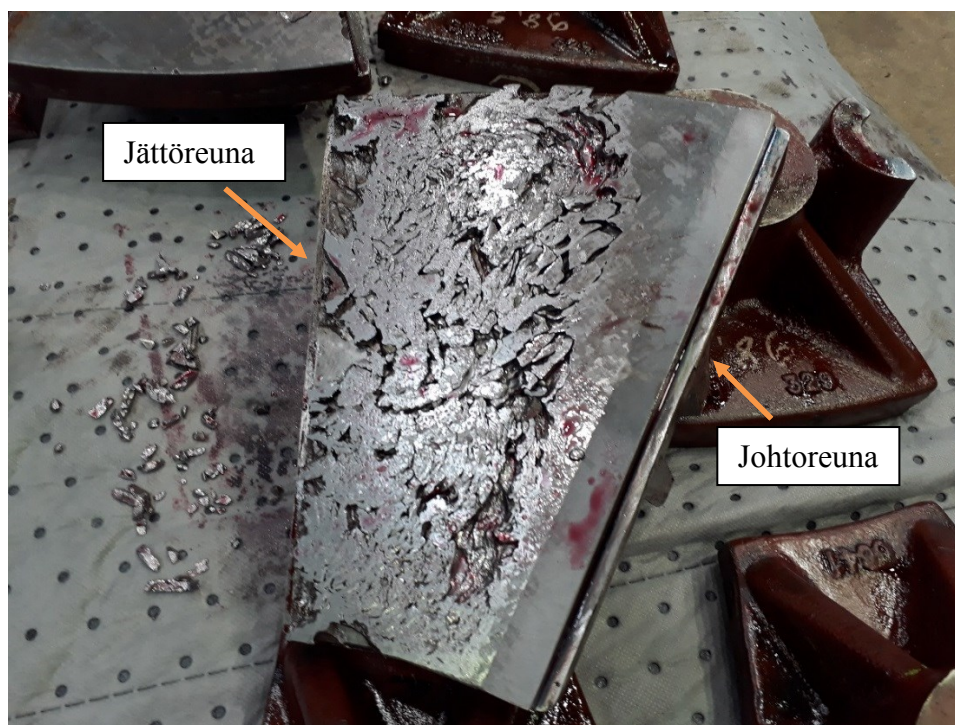


Kuva 6.5: Paksuusmittauksia myllyn sisäseinämästä (Kärnä, 2017).

Hiilimyllyjen vaihteistot ovat kärsineet erinäisistä ongelmista vuosien saatossa. Vaihteiston hammasrattaat ovat säilyneet hyvinä, joskin niitä on vuosien saatossa hieman kunnosteltu. Suurimmat ongelmat ovat laakeroinnissa sekä vaihteistokoteloissa. Viimeisin NDT-tarkastus vaihteiston osille sekä kotelolle tehtiin heinäkuussa 2017. Kuvat tarkastuksesta ovat nähtävissä liitteessä 3. Laakeroinnin ongelmat kohdistuvat pääsääntöisesti pääakselin hydrodynaamiseen painelaakerointiin, jossa segmenttipalojen liukupinnoissa havaittiin pahoja vaurioita. Vaihteiston akselien radiaaliliukulaakereissa havaittiin pieniä avohuokosia, mutta ne täyttivät kuitenkin vielä vaatimukset. (Koskinen 2017, Åkerfelt 2017a.)

Myllyn uudelleen käynnistys aiheuttaa ongelmia segmenttilaakerien valkometallisilla liukupinnoilla. Myllyn pysähtyttyä öljykalvo häviää segmenttilaakerien liukupinnoilta öljypumpun sammuaessa, jolloin pinnat kuivuvat. Myllyn uudelleen käynnistyksessä liukupinnoilla ei täten ole riittävää öljykalvoa, jonka vuoksi liukupintoja vasten liukuva aluslevy aiheuttaa segmenttilaakereille kovan rasituksen. Kuivalla liukupinnalla oleva tartuntakitka muodostaa valkometalliin murtolujuuden ylittäviä voimia, jonka vuoksi liukupinta murtuu. (Luukko, 2017.)

Viimeisimmässä vaihteistohuollossa, segmenttilaakerin liukupinnan kiinnileikkautumista ei havaittu edes irronneissa palasissa. Murtunut liukupinta on nähtävissä kuvassa 6.6. Kuvasta nähdään myös kuinka valkometallikerroksen vaurioituminen lähtee liikkeelle liukupinnan jättöreunasta, sillä se altistuu pidempään kuivuudelle kuin johtoreuna. Liukupinnan johtoreunan puolelle puolestaan muodostuu öljykalvo aiemmin, sillä voiteluöljy ruiskutetaan johtoreunan puolelle ja se kulkeutuu liukupinnalle johtoreunassa olevan viisteen avulla. Alkuperäisessä laakerissa valkometallikerroksen paksuus on 6 mm. Valkometallikerroksen paksuutta ohentamalla ja liukupinnan valmistusmenetelmää muutamalla, saatettaisiin välttyä murtumisongelmilta tai ainakin ne vähenisivät. Lisäksi myllyn käynnistämistä kuormituksen alaisena tulisi välttää ja käynnistyskertojen määrä tulisi minimoida painelaakerien kestävyysden takaamiseksi. (Luukko, 2017.) Tällä hetkellä mylly käynnistyy kevennettynä, mutta ei ilman kuormitusta (Nieminen, 2017b). Asiantuntijan mukaan käynnistystapahtumaa lastissa tulisi kehittää, jotta segmenttien liukupinnat kestäisivät paremmin (Malkki, 2017a). Vaihteisto saattaa olla käyttökuntoinen vaikka segmenttien liukupinnat olisivat vaurioituneet, mutta pinnasta irronnut valkometalli sekoittuu öljyn kanssa ja tukkii öljynsuodattimia. Vaurioituneet laakerit voidaan havaita öljyanalyysien perusteella, joissa valkometallipitoisuudet ovat tavallista korkeampia. (Huovilainen, 2017.)

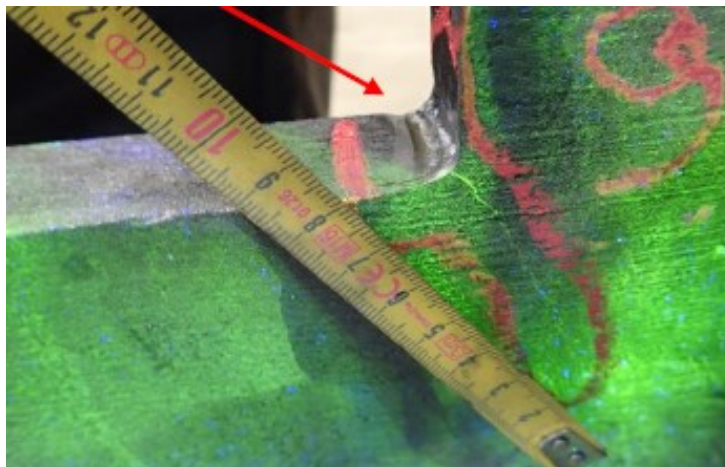


Kuva 6.6: Hilimylly 3 vaihteiston segmenttilaakerin vaurioitunut liukupinta.

Vaihteistokotelot ovat alkuperäiset ja ne ovat valmistettu valamalla. Vaihteistokoteloiden ongelmina ovat säröt, halkeamat sekä huokoset kotelon rakenteissa. Kotelon vauriot eivät ole suoraanaisesti häirinneet myllyjen käyttöä, ainoastaan säröistä ja halkeamista johtuneet öljynvuodot ovat hieman sotkeneet vaihteistojen ympäristöä sekä aiheuttaneet turhaa työtä öljyn säännöllisen lisäämisen vuoksi, (Luukko, 2017).

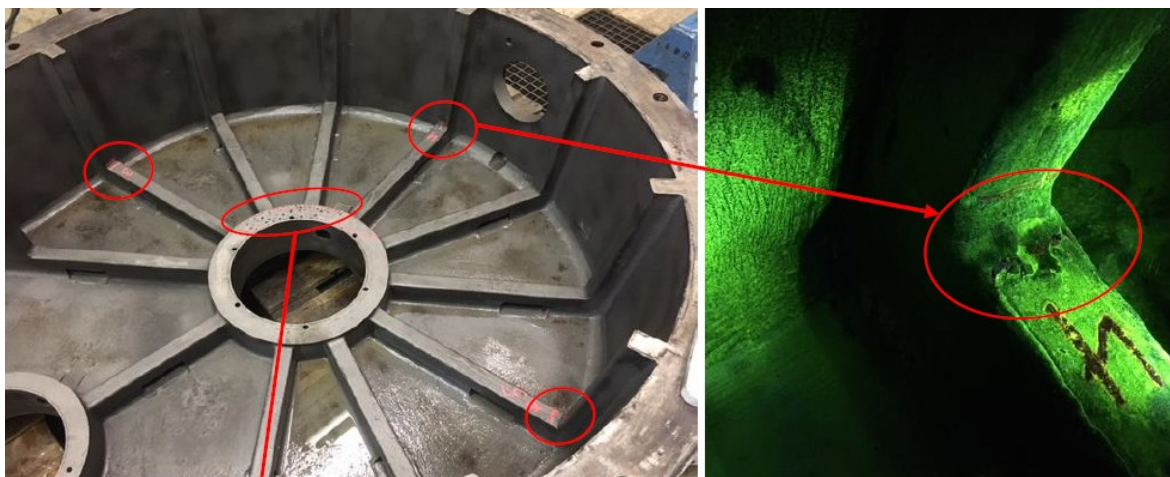
Heinäkuussa 2017 tehdyssä NDT-tarkastuksessa tutkittiin kotelon vaurioita silmämääräisesti sekä magneettijauhemenetelmää käyttäen. Tarkastuksessa havaittiin säröjä ja halkeamia useissa paikoissa sekä avohuokosia pääakselin läpiviennissä kotelon alapuoliskossa.

Kotelon yläpuoliskossa haivatut säröt olivat hyvin pieniä. Kotelon huoltoluukun kehyksistä löytyi pitkiä ja syviä säröjä, esimerkki säröstä nähdään kuvassa 6.7. Säröt huoltoluukun kehyksissä ovat olleet yleinen ongelma myös muiden vaihteistokoteloiden NDT-tarkastuksissa (Kumpulainen 2017, Åkerfelt 2017a.)



Kuva 6.7: Yksi vaihteistokotelon NDT-tarkastuksessa löydettyistä huoltoluukun säröistä (Åkerfelt, 2017a).

Viimeisimmässä tarkastuksessa havaittiin säröjä huoltoluukun lisäksi erityisesti alapuoliskon jäykistysripojen nurkissa, jotka nähdään kuvassa 6.8. Myöhemmin säröjä korjattaessa kävi ilmi, että jokaisessa rivassa oli särö. Aiemmissa NDT-tarkastuksissa on löydetty säröjä myös kotelon yläpuoliskon sisäpuolisista jäykistysriboista sekä alapuoliskon ulkopuolisista rivoista. Kuvassa 6.8 nähdään myös avohuokosia, joita löydettiin pääakselin läpiviennin läheisyydestä. Vastaavia avohuokosia ei ole havaittu aiemmissa tarkastuksissa, mutta läpivienneissä olevien pultin reikien läheisyydestä on löydetty säröjä aiemmin kotelon yläpuoliskossa. Koteloista on tarkastuksissa löytynyt säröjä myös koteloiden seinämistä sekä pohjasta. (Kumpulainen 2017, Åkerfelt 2017a.) Liitteessä 3 on nähtävissä lisää kuvia kotelon NDT-tarkastuksista.



Kuva 6.8: NDT-tarkastuksessa löydetyt avohuokokset pääakselin läpiviennin läheisyydessä ja jäykistysriboista löydettyt säröt (Åkerfelt, 2017a).

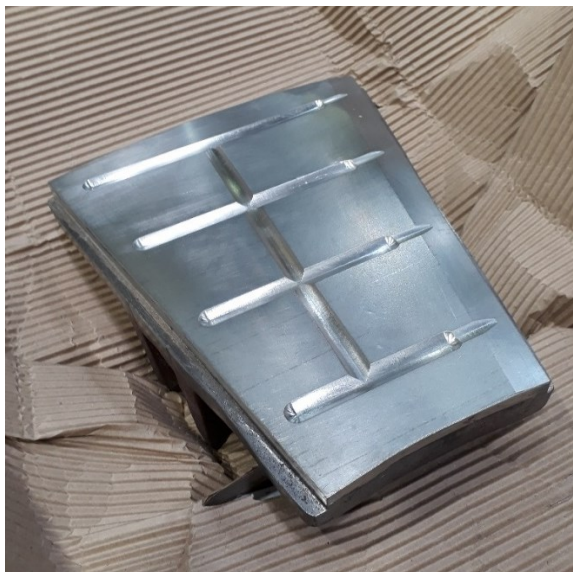
Pellettien jauhatuksen on todettu laskevan jauhatuksesta aiheutuvien iskujen kokonaistasoa myllyssä, mutta hetkellisesti vaikuttavat dynaamiset iskut ovat voimakkaampia kuin pelkällä hiilellä jauhettaessa. Hanasaaren B-voimalaitoksella on tutkittu, että pelletin jauhatus hiilen

seassa kuluttaa enemmän virtaa. Suurempi virran kulutus kertoo korkeammasta rasituksesta, joka ilmenee kasvavana vääntömomenttina myllyn vaihteistossa. (Huovilainen 2017, Luotonen 2017, Luukko 2017, Kivi 2017, Kontro 2017, Malkki 2017a, Nieminen 2017b, Viuhko 2017.) Mikäli vääntömomentti on merkittävästi suurempi pellettiä jauhettaessa hiilen joukossa, ja myllyn kuormituksen alaisia pysähdyksiä tapahtuu riittävän usein, on mahdollista, että vaihteistokotelo joutuu edellä mainittujen tekijöiden vuoksi kovemmalle rasitukselle kuin pelkästään hiiltä jauhettaessa. Pysähdyksistä aiheutuvan rasituksen ehkäisemiseksi harkittiin kytkimen hankkimista vaihteiston ja myllyn väliin. Ideasta luovuttiin, sillä asiantuntijoiden sekä vaihteistotoimittajan mukaan tähän tarkoitukseen ei ole mahdollista eikä järkevää hankkia kytkintä (Huovilainen 2017, Koskinen 2017, Lampinen 2017, Malkki 2017a, Nieminen 2017b).

6.5 Vaurioiden korjaaminen

Myllyjen kuluneita sisäseinämiä korjataan kulutuksen kestäväällä panssarilevyllä ja säröjä sekä halkeamia myllyn rakenteissa ja osissa korjataan hitsaamalla. Jousikiristyskehyksen korvakkeissa ilmenneitä vaurioita korjataan hitsaamalla. Korjaushitsaukset eivät kuitenkaan koskaan ole yhtä lujia kuin perusaine. Korjaamalla korvakkeita voidaan hankkia lisää aikaa muutamia vuosia, mutta lopulta kehys tulee uusia. (Malkki, 2017a.)

Vaihteistojen korjauksessa keskitytään enimmäkseen laakerien ja vaihteistokotelon kunnostukseen. Alkuperäisissä segmenttilaakereissa liukupinnan valkometallikerros on kiinnitetty segmenttiin valamalla, joka onkin valmistusmenetelmänä osoittautunut epäsuotuisaksi kuvassa 6.4 käsiteltyjen laakerivaurioiden perusteella. Mikäli valkometalli kiinnitettäisiin ruiskuttamalla valamisen sijaan, liukupinnasta tulisi kovempi. Liukupintaa valmistettaessa ruiskuttamalla, valkometallikerros on ohuempi kuin valettaessa. Kesällä 2017 huolletun vaihteiston segmenttilaakerien liukupinnat päätettiin uusia ruiskuttamalla. (Luukko, 2017.) Palvelu ostettiin ulkopuoliselta toimittajalta, joka teki vetokokeen olemassa olevalle liukupinnalle ja ruiskutti uuden pinnoitteen vanhan tilalle. Vetokoe osoitti, että alkuperäinen 6 mm valkometallikerros oli lujasti kiinni ainakin niiltä osin kun se oli ehjä. Liukupinnan valkometallikerroksen paksuus päätettiin pitää samoissa lukemissa ruiskutetuissa liukupinnoissa. Myllyn pysähtymisestä aiheutuvan liukupinnan kuivumisen ehkäisemiseksi, liukupintaan koneistettiin 3 mm syvät urat eli voiteluöljytasket. Taskujen tehtävänä on varmistaa, että myllyn pysähtyttyä liukupintojen keskellä on voiteluöljyä. Tällä tavoin voidaan varmistua siitä, että aluslevy ei joudu liukumaan kuivilla liukupinnoilla myllyä käynnistettäessä. (Tikkala, 2017.) Kuvassa 6.9 nähdään uudelleenpinnoitetut laakerit.



Kuva 6.9: Uudelleen pinnoitettu segmenttilaakeri voiteluöljytaskuilla varustettuna.

Lisätyösuunnitelman vaativia korjaustoimenpiteitä saattavat vaatia myös vaihteistokotelossa ilmenevät vauriot. Vaihteistokotelon säröjen korjausmenetelmäksi päätettiin valita tikkaus, jolloin korjatuista kohdista tulee yhtä lujia kuin perusaineesta. Tikkaus on niin kutsuttu kylmä menetelmä, jolloin vältetään lämmön aiheuttamilta materiaaliominaisuuksien muutoksilta. Päätyporauksen käyttäminen korjausmenetelmänä ei ollut mahdollista, koska osa säröistä olivat liian syviä. Sulamenetelmiä ei haluttu käyttää, sillä ne saattaisivat vaikuttaa materiaalien ominaisuuksien kautta kotelon kestävyys ja taipumukseen vaurioitua entistä pahemmin. Asiantuntijan mukaan suomugrafiittivalurautaisten valukappaleiden vaurioiden korjaaminen hitsaamalla ei takaa riittävän hyvää kestävyyttä kotelolle. (Luukko, 2017.) Kotelossa olevien avohuokosten täyttämiseen käytettiin epoksipohjaista komposiittiseosta, joka käytiin läpi luvussa 5.5. Kuvassa 6.10 nähdään esimerkki vaihteistokotelon huoltoluukun särön korjauksesta. Korjaustoimenpide noudattaa luvussa 5.5 läpikäytyjä korjausvaiheita.



Kuva 6.10: Vaihteistokotelon huoltoluukun yksi särö korjattu tikkausmenetelmällä (Åkerfelt, 2017b).

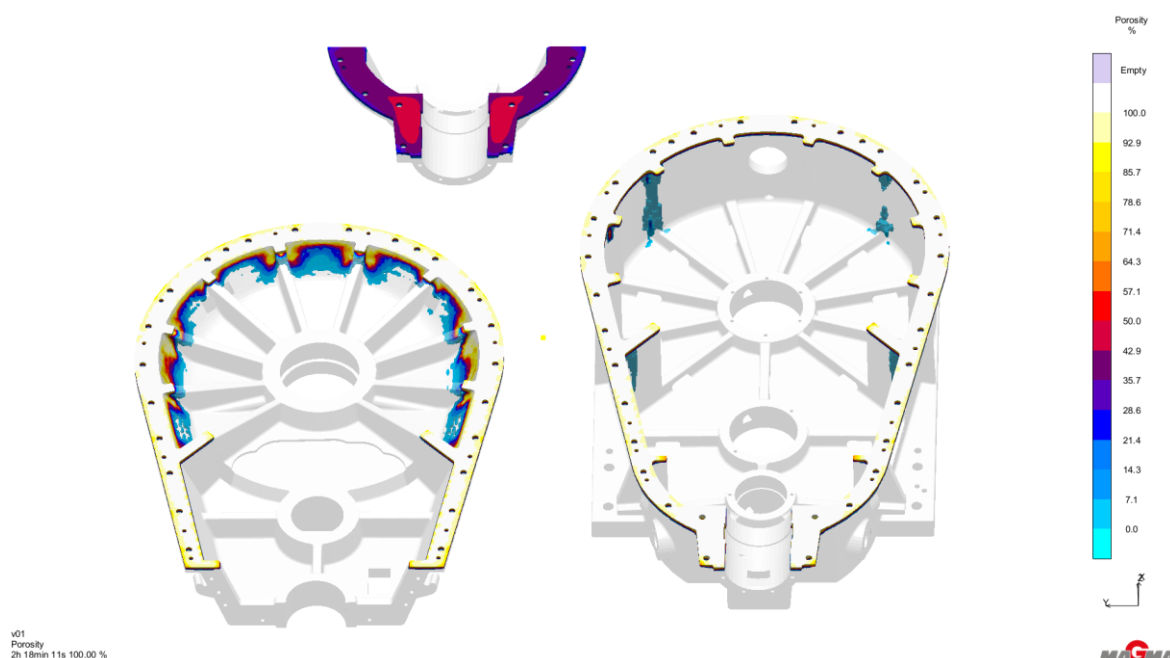
6.6 Vaihteistokotelon valutekninen tarkastelu

Vaihteistokotelon rakennetta tarkasteltiin valuteknisestä näkökulmasta. Kuten jo aiemmin mainittiin, vaihteistokotelon huoltoluukun nurkkiin on ilmestynyt säröjä useampaan otteeseen, jäykistysripojen nurkkakohdissa on säröjä sekä pääakselin läpiviennin seudulta löytyi huomattava määrä avohuokosia. Lisäksi säröjä on löydetty muun muassa kotelon seinämistä

ja pohjasta sekä akselien läpivienneistä. Tämän kaltaiset ongelmat rakenteissa antavat aiheita tarkemmalle tarkastelulle. Koteloille tehtyjen NDT-raporttien kuvat löytyvät liitteestä 2.

Vaihteistokotelon materiaalia tutkittiin jo aiemmin OES-analyysillä asiantuntijan toimesta, ja materiaaliksi osoittautui suomugrafiittivalurauta (Savolainen, 2015). Kuten jo aiemmin mainittiin, suomugrafiittivaluraudalla on hyvät värähtelyominaisuudet, joten se soveltuu hyvin tällaisten vaihteistokoteloiden materiaaliksi. Suomugrafiittivalurauta on myös valetta- vuodeltaan hyvä, jolloin materiaalin laatu on hyvää ja huokoisuus vähäistä (Jalava, 2017b.)

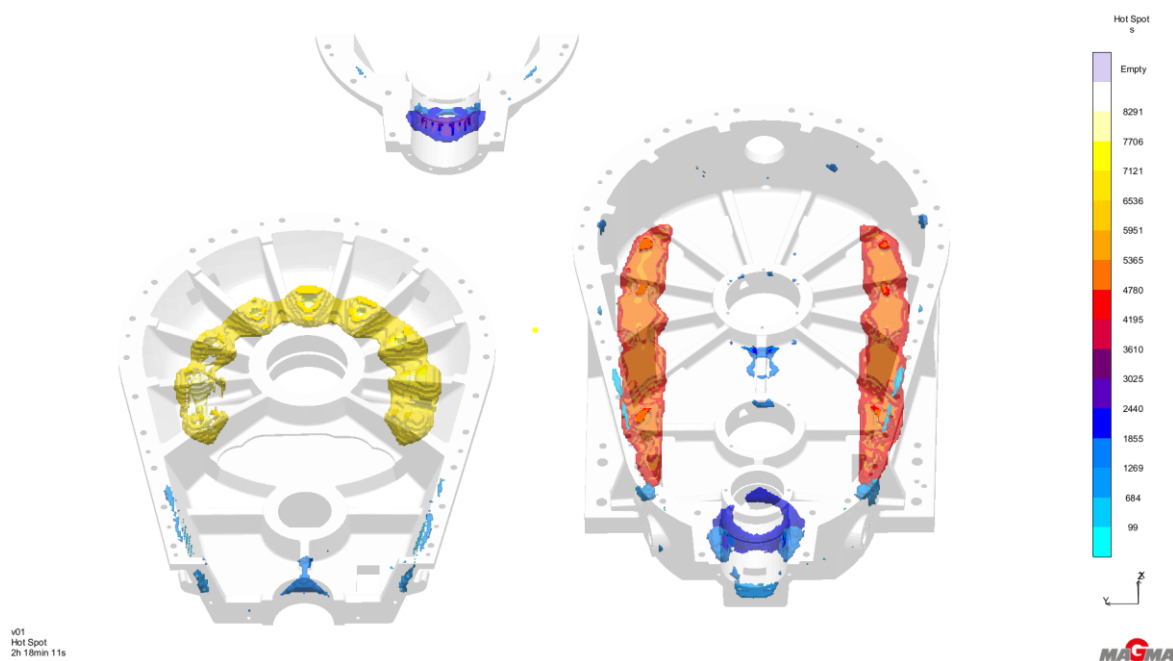
Vaihteistokotelolle tehtiin valusimulaatio Magmasoft Magma v.5.3 -ohjelmistolla, jossa tarkasteltiin kotelon materiaalin huokoisuusennustetta (*engl. porosity*) sekä niin kutsuttuja kuumia alueita (*engl. hot spot*), jotka pysyvät sulana kauemmin kuin ympäröivä materiaali keskimäärin. Lisäksi tutkittiin sulan jäähmettymisrintamaa (*engl. fraction solid*) animaation avulla, jolla tarkoitetaan sulan jähmeää ja nestemäistä suhdetta. Mitä tasaisemmin sula katoaa, sen parempi. (Jalava, 2017b.) Valusimulaation tulokset ovat nähtävissä kuvissa 6.11 ja 6.12.



Kuva 6.11: Vaihteistokotelon huokoisuusanalyysi valusimulaation avulla (Jalava, 2017a).

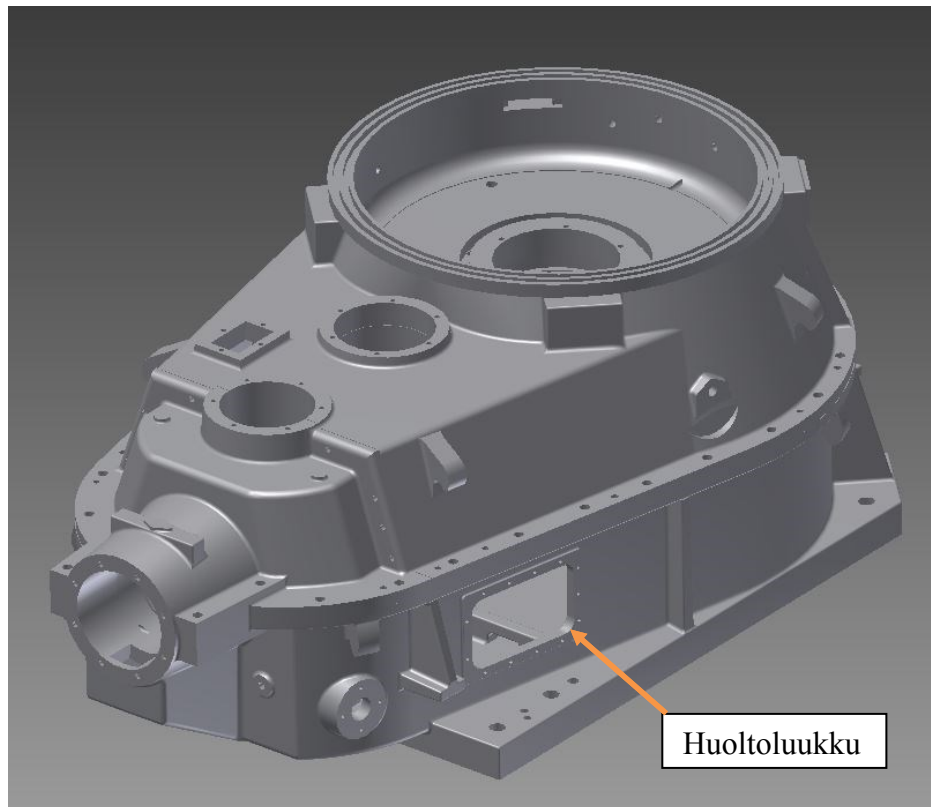
Kuvan 6.11 huokoisuusanalyysia tutkiessa on kuitenkin otettava huomioon, että kyseinen valusimulaatio tehtiin ilman tietoisuutta minkälaisella valu- ja syöttöjärjestelmällä kotelo on valettu. Tästä johtuen kotelon yläosiin muodostuu huokoisia alueita, joissa huokoisuusanalyysi ei kuitenkaan pidä paikkaansa. Kappaleen yläosan materiaali syöttää alempia alueita, jolloin huokoisuutta on havaittavissa, vaikka todellisuudessa tilanne on eri. Simulaatio kuitenkin osoittaa, että huokoisuutta on havaittavissa kahden jäykistysrivin seuduilla. Tämä tieto tukee hyvin NDT-raportteja, joissa jäykistysripojen nurkissa havaittiin säröjä. Nurkat ovat myös valuteknisesti huonosti suunniteltuja, sillä niissä on hyvin pieni R-mitta eli pyöristys. Tiukat nurkat ja pienet pyöristykset ovat tunnetusti säröherkkiä alueita. Pienet pyöristykset ovat myös merkittävä ongelma huoltoluukun nurkissa, jotka säröilevät toistuvasti. (Jalava, 2017b.)

Suomugrafiittivaluraudan hyvistä ominaisuuksista huolimatta pääakselin läpiviennissä olevasta massakeskittymästä löytyi avohuokosia, joita käsiteltiin luvussa 6.4. Lisäksi pieniä säröjä on löydetty vuonna 2014 kotelon yläpuoliskon pääakselin läpiviennin ympärillä olevien pultinreikien läheisyydestä. Valusimulaation tuloksissa ei kuitenkaan ole viitteitä huokoisuudesta tai massakeskittymien pitkästä sulana pysymisestä. Tämä tulos osoittaa, että akselien läpivienneissä mahdollisesti esiintyvät huokokset ja säröt eivät ole materiaalista tai suunnittelusta johtuvia virheitä, vaan ne johtuvat täysin valimon tekemistä virheistä. (Jalava, 2017b.) Tietenkään ei voida pois sulkea mahdollisia materiaalitekniisiä vauriomekanismeja, jotka ovat saattaneet aiheuttaa säröilyä koteloidissa.



Kuva 6.12: Vaihteistokotelon hot spot -analyysi, jossa tutkitaan valukappaleen jähmettymistä (Jalava, 2017a).

Kuvan 6.12 hot spot -analyysin tulokset sekä jähmettymisanimaatio osoittavat, että kotelon pohjan reuna-alueet pysyvät kuumana pitkään muodostaen ripojen ja luukkujen alueelle huomontavaa valua. Tavallista pidempään kuumana ollut valu on aina vikaantumisherkempi kuin tavanomaisesti jähmettynyt sula, ja erityisesti erillään olevat sula-alueet ovat vika-herkkiä. Tämä saattaa selittää ripojen ja luukkujen sekä kotelon pohjasta löydettyt säröt. (Jalava, 2017b.) Kuvassa 6.13 nähdään kuva vaihteistokotelon CAD-mallista. Malli on tehty olemassa olevan kotelon mittojen mukaisesti, mutta ei kuitenkaan ole riittävän tarkka valmistusta ajatellen. Huoltoluukun nurkat ovat kyseisessä mallissa mallinnettu virheellisesti liian pyöreiksi. Nurkkien todellinen muoto nähtiin kuvissa 6.7 ja 6.8.

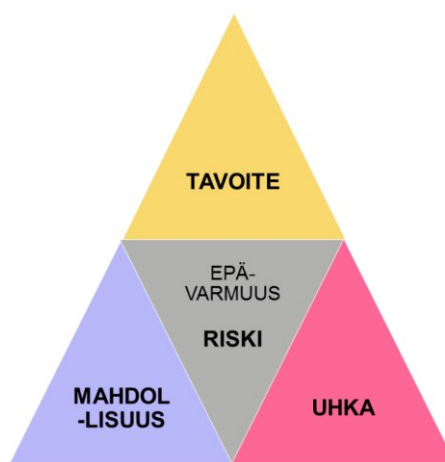


Kuva 6.13: *Vaihteistokotelon CAD-malli (Valimoinstituutti, 2015).*

Kuten kuvasta 6.13. nähdään, vaihteistokotelossa on paljon teräviä kulmia ja pieniä pyöristyksiä, joihin kohdistuu suuria jännityksiä ja tekee niistä täten vikaantumisherkkiä kohtia. Kotelon kanttisen designin vuoksi suunnattu jähmettyminen on vaikeampaa toteuttaa kuin, jos muodot olisivat kaarevampia. Tämä saattaa aiheuttaa huokoisuutta materiaalissa, joita ei huokoisuustutkimuksessa tullut ilmi, koska tutkimusta tehdessä ei voitu tietää mistä suunnasta sulaa valmistajan mukaan on tarkoitus syöttää. Kotelossa tulisi luukun nurkkien ja riipojen lisäksi olla yleisesti ottaen vähemmän teräviä kulmia ja isommat pyöristykset kauttaaltaan. (Jalava, 2017b.)

7 Riskienhallinta ja arviointi

Helenin määritelmän mukaan riski kuvastaa tavoitteeseen vaikuttavaa epävarmuutta. Riskiä voidaan pitää tavoitteesta poikkeavana mahdollisuutena tai uhkana. Riskien arvioinnissa määritetään millä todennäköisyyksillä käsiteltävät epävarmuudet vaikuttavat ja toteutuvat. Todennäköisyyksien tulo kuvaa riskin luonnetta ja sitä tarkastellaan ennalta määritetyllä ajanjaksolla, joka on tavallisesti yksi vuosi. Tällä tavoin saadaan liiketoimintaan liittyvien riskien vaikutukset yhtenäistettyä. Poikkeuksena ovat investointiprojektit, joissa ajanjaksona käytetään projektin kokonaiskestoaikaa. (Rynö ym. 2017.) Riskin määritelmä nähdään kuvassa 7.1.



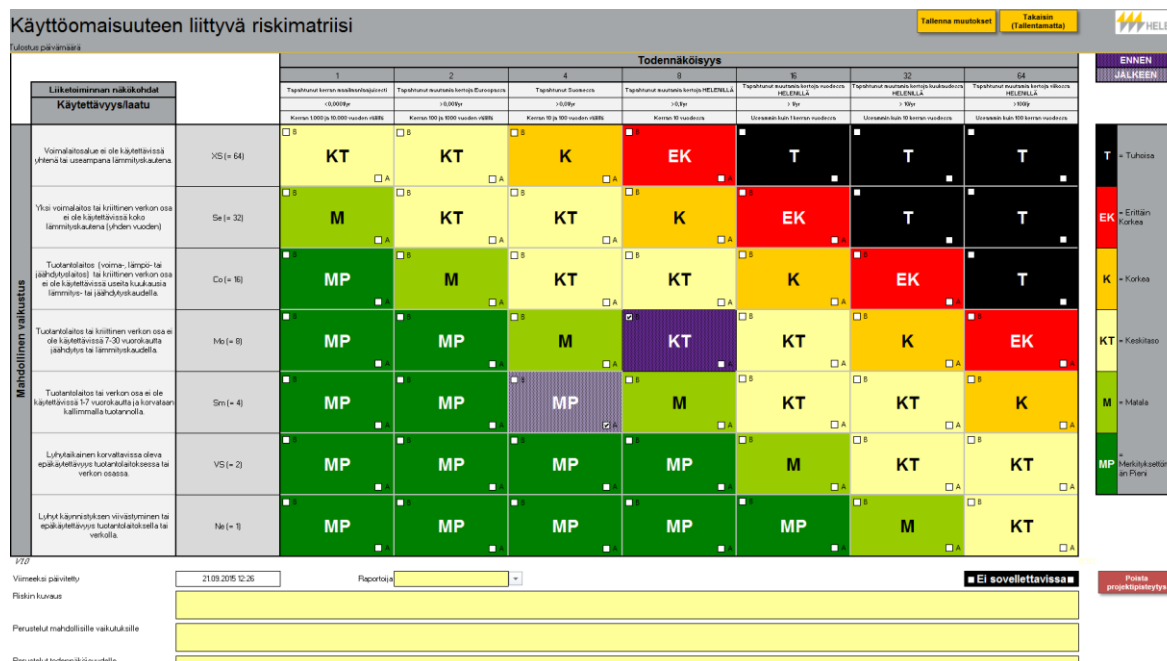
Kuva 7.1: Riskin määritelmä (Rynö ym. 2017).

”Riskienhallinnalla tarkoitetaan järjestelmällistä ja ennakoivaa tapaa tunnistaa, analysoida sekä hallita toimintaan liittyviä epävarmuuksia.” (Rynö ym. 2017). Riskienhallintaa käytetään pääsääntöisesti yrityksen toiminnan varmistamiseen, sijoittavien omistajien ja pankkien sijoitusten arvon turvaamiseen sekä täyttämään sijoittajien tuottovaatimukset. Yrityksille voidaan asettaa ulkoisia vaatimuksia, jonka vuoksi riskienhallinta on hyvin tärkeää. Ulkoisilla vaatimuksilla tarkoitetaan julkisen säätelyn kautta tulevia vaatimuksia ja eri sidosryhmien, kuten työntekijöiden ja asiakkaiden asettamia vaatimuksia riskienhallintatyölle. Riskienhallinnalla ei tarkoiteta irrallista prosessia tai ulkopuolista toimintaa, vaan riskienhallinta on aina yhteydessä yrityksen arvoihin sekä strategiaan. (Ilmonen ym. 2010.)

Helen käyttää riskien arvioinnissa riskimatriisityökalua, jonka avulla arvioidaan liiketoimintatariskejä vaikuttavuuden sekä todennäköisyyden suhteen. Riskien vaikuttavuus riippuu liiketoiminnan näkökohdista, kuten muun muassa käytettävyydestä, taloudesta ja turvallisuudesta. Riskien toteutumisen todennäköisyys arvioidaan kuvassa 7.2 nähtävien sarakkeiden perusteella. (Rynö ym. 2017.) Tämä on esimerkki riskimatriisista, jonka näkökohdaksi on valittu käytettävyys. Kyseisellä riskimatriisilla voidaan arvioida mahdollisen investoinnin tai muutoksen vaikutusta riskitasoon.

Riskimatriisien tulokset, eli riskitasot ennen ja jälkeen investoinnin tai muutoksen, tallentuvat projektikirjastoon, jossa jokaiselle suunnitteilla ja käynnissä olevalla sekä vaihtoehtoisille projekteille on omat rivinsä. Projektikirjastoon kirjataan kunkin projektin perustiedot ja niiden mahdolliset linkitykset toisiinsa. Projekteihin sovelletaan riskirekisteriin kirjattuja

riskejä ja mahdollisen yhtäläisyyden osuessa kohdalle, kyseinen riski linkitetään projektikirjastossa olevaan projektiin. Riskirekisteriin kirjataan kaikki omaisuudenhallintaan liittyvät liiketoimintatason riskit. (Rynö ym. 2017.)



Kuva 7.2: Esimerkki riskimatriisityökalun käytöstä, jossa arvioidaan käytettävyyssriskejä (Rynö ym. 2017).

7.1 Riskien arviointi

Hiilimyllyjen modernisoinnin vaikutuksia arvioitiin Helenin riskienhallinnan riskimatriisi-työkalun avulla. Riskimatriisissa arvioitiin modernisointiprojektin riskejä ennen ja jälkeen toteutuksen. Helenillä on käytössä kuusi riskitasoa, joiden avulla kuvataan riskin vakavuutta. Riskitasot ovat nähtävissä taulukossa 7.1. Hiilimyllyjen tapauksessa tarkasteltiin hiilimyllyjen vikaantumisia ja niiden aiheuttamia vaikutuksia eri osa-alueisiin, kuten talouteen, käytettävyyteen sekä turvallisuuteen. Hiilimyllyjen vikaantumisesta tehtyjen häiriöraporttien puutteellisen datan vuoksi vikaantumistaajuutta ei voitu määrittää tilastollisesti, joten riskien arvioinnissa turvauduttiin asiantuntijoiden lausuntoihin. Vaihteistojen uusimista ja korjaamista varten ei tehty omaa riskien arviointia, koska asiantuntijoiden mukaan mahdollisesti suurempi muutos riskeissä ennen ja jälkeen toteutuksen, ei tämän riskimatriisin mittakaavassa kuitenkaan aiheuta riskitason muutosta (Huovilainen 2017, Koskinen 2017, Malkki 2017a, Nieminen 2017b).

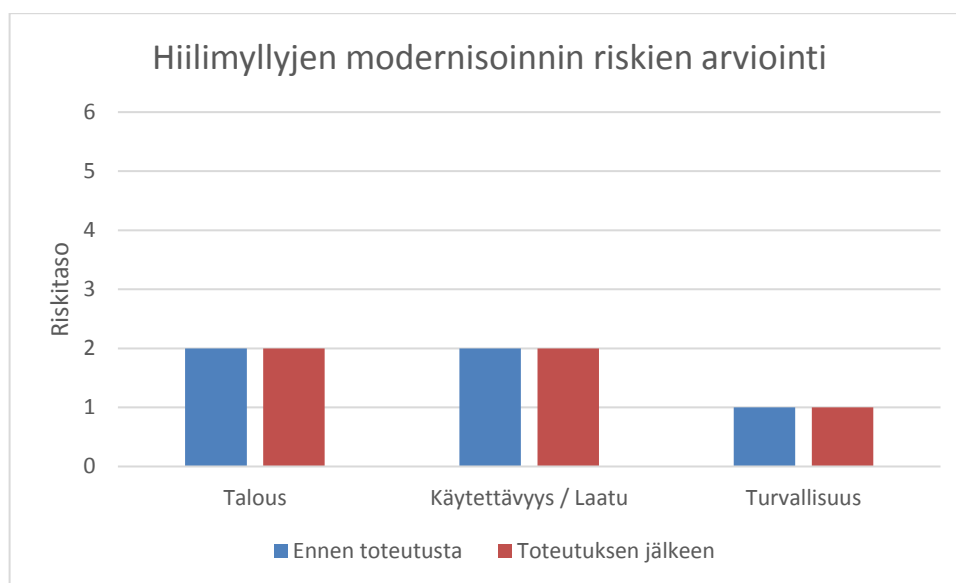
Taulukko 7.1: Helenin riskimatriisiin mukaiset riskitasojen kuvaukset.

Riskitaso	Selitys
6	= Tuhoisa, T
5	= Erittäin korkea, EK
4	= Korkea, K
3	= Keskitaso, KT
2	= Matala, M
1	= Merkityksettömän pieni, MP

Talouden osa-alueessa käsiteltiin myllyjen vikaantumisesta johtuvia mahdollisia taloudellisia vahinkoja tai vaikutuksia yrityksen tulokseen. Hiilimyllyjen vikaantuminen saattaa aiheuttaa taloudellista vahinkoa, mikäli voimalaitosta joudutaan häiriön vuoksi ajamaan vajaalla teholla ja käyttämään raskasta polttoöljyä tukipolttoaineena. Tästä aiheutuu energianhankinnan ja kunnossapidon lisäkustannuksia. Hiilimyllyjen alasajoja myllystä johtuvan häiriön vuoksi tapahtuu muutaman kerran vuodessa. (Huovilainen 2017, Koskinen 2017, Malkki 2017a, Nieminen 2017b.)

Käytettävyyden ja laadun osa-alueessa arvioitiin voimalaitoksen mahdollista epäkäytettävyyttä myllyjen vikaantumisen seurauksena. Hiilimyllyjen vikaantuminen saattaa aiheuttaa epäkäytettävyyttä voimalaitoksessa, jolloin tuotanto saatetaan joutua korvaamaan tukipolttoaineella ja tekemään käytönaikaisia kunnossapitotöitä. (Huovilainen 2017, Koskinen 2017, Malkki 2017a, Nieminen 2017b.)

Turvallisuussosiossa arvioitiin myllyjen vikaantumisesta aiheutuneita onnettomuuksia sekä mahdollisia työtapaturmia. Hiilimyllyjen pysäytyksen yhteydessä saatetaan todeta myllyssä olemassa oleva hiilen kytöpalo tai pölyräjähdys. Myllyn tyhjentäminen ja mahdollisen palon sammuttaminen saattavat aiheuttaa palovammoja työntekijälle. Hiilimyllyjen vikaantumisista johtuvia työtapaturmia sattuu muutamia vuodessa. (Huovilainen 2017, Koskinen 2017, Malkki 2017a, Nieminen 2017b.) Riskien arvioinnin tulokset ovat nähtävissä kuvassa 7.3.



Kuva 7.3: Hiilimyllyjen modernisoinnin riskien arviointi (Huovilainen 2017, Koskinen 2017, Malkki 2017a, Nieminen 2017b).

Riskien arvioinnin tuloksista nähdään, että hiilimyllyjen modernisoinnilla ei ole vaikutusta omaisuuden riskienhallinnan riskitasoihin millään osa-alueella. Modernisointi ei vaikuttaisi hiilimyllyjen häiriöiden aiheuttamien taloudellisten vahinkojen suuruuteen merkittävästi. Myöskään hiilimyllyjen käytettävyys eikä turvallisuus eivät arvioinnin perusteella paransi juuri yhtään. On tietenkin mahdollista, että riskit pienenisivät hieman modernisoinnin myötä. Mahdollinen muutos olisi kuitenkin niin vähäistä, ettei se vaikuttaisi riskitasojen muuttumiseen tässä arvioinnissa käytetyn riskimatriisin mittasuhteissa.

8 Investoinnin kannattavuus

Tässä luvussa kuvataan lyhyesti investointilaskentaa ja herkkyysanalyysia, sekä tutkitaan hiilimyllyjen ja niiden vaihteistojen sekä vaihteistokoteloiden investoinnin kannattavuuslaskelmia ja herkkyytetään kunnossapitokustannuksia. Lisäksi selvitetään vaihteistokoteloiden valmistuksen kannattavuusraja valmistusmenetelmän perusteella.

8.1 Investointilaskelma ja herkkyysanalyysi

Investointilaskelmien avulla kartoitetaan eri vaihtoehtoja yrityksen tulevaisuutta varten, ja tutkitaan näiden vaihtoehtojen edullisuutta. Investointilaskelmissa käytetään erilaisia lähtöarvoja, jotka voidaan määrittää arvioimalla tai mittaamalla. Investointilaskelmien lähtöarvot ovat (Suomala ym. 2011.):

- Perusinvestointi eli perushankintakustannus
- Nettotuotot eli vuotuinen kassavirta
- Investoinnin pitoaika
- Investoinnin jäännösarvo
- Laskentakorkokanta.

Perusinvestoinnilla tarkoitetaan reaali-investoinnin kohdalla kustannuksia, jotka aiheutuvat esimerkiksi uuden koneen hankkimisesta, asentamisesta ja työntekijöiden kouluttamisesta uuden koneen käyttöä varten. Nettotuotoilla tarkoitetaan investoinnin myötä syntyvien tuottojen tai kustannussäästöjen ja kustannusten erotusta. Nettotuottojen on hyvä olettaa ajoittuvan kunkin vuoden loppuun, jolloin eri investointivaihtoehtojen vertailu on realistisempi. Investoinnin pitoaika määritetään tavallisesti investoinnin taloudellisen käyttöaika-arvion perusteella. Tapauksesta riippuen pitoajaksi voidaan kutsua esimerkiksi koneen ennustettua käyttöikää. Investoinnin jäännösarvolla tarkoitetaan myyntituloja, jos investointikohteeseen myytisiin pitoajan päätteeksi. Mikäli investointikohteesta luopuminen pitoajan päätteeksi aiheuttaa kustannuksia yritykselle hävittämisen muodossa, on investoinnin jäännösarvo negatiivinen. Laskentakorkokantaa käytetään, jotta eri vuosina saatavat nettotuotot olisivat vertailukelpoisia. Vuosittaisten nettotuottojen sijoittuminen investoinnin pitoajalle määrittelee investoinnin aikaansaaman kassavirran arvon. Investointiin sidotun pääoman kustannukset saadaan huomioitua laskentakorkokannan avulla, jota voidaankin itseasiassa pitää investoinnin minimituottovaatimuksena. Investoinnin luonne ja yrityksen rahoituskustannukset määrittävät tuottovaatimuksen. Vuosittaiset nettotuotot, jotka ovat saavutettu investoinnin avulla, diskontataan laskentakorkokannan mukaan pitoajan alkuun. Diskonttauksella tarkoitetaan korkolaskulle käänteistä prosessia, jossa pyritään määrittämään investointikohteen rahallinen arvo määrätyn pitoajan päätteeksi. (Suomala ym. 2011.)

Investointivaihtoehtoja vertaillaan käyttämällä erilaisia laskentamenetelmiä, joiden avulla voidaan määrittää taloudellisesti kannattavin investointivaihtoehto. Tyypillisimmät laskentamenetelmät nähdään alla. (Suomala ym. 2011.):

- Nettonykyarvo
- Sisäinen korkokanta
- Takaisinmaksuaika
- Annuiteettimenetelmä
- Pääoman tuottomenetelmä.

Nettonykyarvoa (*engl. net present value*) laskettaessa investoinnin pitoajan alkuun diskonttatut nettotuotot, investoinnin jäännösarvo ja mahdollinen pitoajan lopussa vapautuva käytöpääoma vähennetään perusinvestointikustannuksista. Mikäli nettonykyarvo on positiivinen, investointia voidaan pitää kannattavana. Teoreettisesta näkökulmasta nettonykyarvo soveltuu parhaiten investoinnin kannattavuuden laskemiseen. Nettonykyarvo kannattaakin aina laskea, vaikka investoinnin taloudellisessa paremmuuden arvioinnissa käytettäisiin muita menetelmiä. (Suomala ym. 2011.)

Sisäinen korkokannalla (*engl. internal rate of return*) tarkoitetaan sitä korkokantaa, jolla nettonykyarvo on nolla. Mikäli investoinnin arvioitu tuotto-prosenti ei ole suurempi kuin sisäinen korkokanta, investointia voidaan pitää kannattavana. Tällöin korkeimman sisäisen korkokannan omaava investointivaihtoehto on kannattavin. Sisäisen korkokannan laskemisessa on kuitenkin huomioitava muutama tyypillinen ongelma. Sisäisiä korkokantoja voi olla useampi kuin yksi, jolloin nettonykyarvo voi siis olla negatiivinen tai positiivinen, eikä se suoraan kerro onko investointi kannattava vai ei. (Suomala ym. 2011.)

Investoinnin takaisinmaksuajalla (*engl. payback*) tarkoitetaan aikaa, jonka kuluessa perusinvestointi saadaan kustannettua nettotuottojen avulla. Takaisinmaksuaikaa laskettaessa ei yleensä huomioida rahan aika-arvoa, vaan aika-arvo määritetään ennen takaisinmaksuajan laskemista diskonttaamalla nettotuotot investoinnin pitoajan alkuun. Takaisinmaksuaikaa laskemalla ei voida selvittää investoinnin kannattavuutta tarkasti, koska laskelmassa ei huomioida kassavirtoja, jotka tulevat takaisinmaksuajan jälkeen. Menetelmä soveltuu kuitenkin karkeaan ja nopeaan kannattavuuden arviointiin eri vaihtoehtojen välillä. (Suomala ym. 2011.)

Annuiteettimenetelmää käytettäessä perusinvestointi jaotellaan pääomakustannuksiksi eli annuiteeteiksi. Annuiteetit jaetaan tasaisesti investoinnin pitoajalle, ja ne ovat summiltaan yhtä suuria. Annuiteetti rakentuu korko- ja poisto-osuuksista, ja mikäli annuiteetti on pienempi kuin vuosittainen nettotuotto, investointia voidaan pitää kannattavana. Pääoman tuotomenetelmässä investoinnin tuottoaste eli ROI lasketaan jakamalla arvio vuotuisesta tuloksesta investointiin sidotulla keskimääräisellä pääomalla, josta on kuitenkin ensiksi vähennetty poistojen osuus. (Suomala ym. 2011.)

Herkkyysanalyysi (*engl. sensitivity analysis*) kuuluu epävarmuuden huomioimismenetelmin investointilaskelmissa. Sen avulla pyritään selvittämään eri lähtöarvojen muutoksien vaikutuksia investoinnin kannattavuuteen. Herkkyysanalyysi voidaan toteuttaa esimerkiksi seuraavin keinoin. (Suomala ym. 2011.)

Ensimmäisenä keinona on tutkia kuinka yhtä lähtöarvoa kerrallaan muuttamalla voidaan vaikuttaa investoinnin kannattavuuteen ja mitkä tekijät siihen vaikuttavat. Tämä ei kuitenkaan paljasta lähtöarvojen keskinäisiä riippuvuuksia. Toisena keinona on muuttaa useampia lähtöarvoja kerrallaan, joka voidaan toteuttaa esimerkiksi valitsemalla kullekin lähtöarvolle huonoin ja paras mahdollinen arvo. Tällä tavoin voidaan helposti nähdä, minkälainen arvojoukko investoinnin lopputuloksella todennäköisesti on, mutta eri vaihtojen todennäköisyyksiä ei saada selville. Kolmantena keinona on muodostaa todennäköisyysjakauma lopputuloksen kannalta tärkeille lähtöarvoille. Jakauman perusteella voidaan määrittää laskennallisesti kaikki mahdolliset toteutumat ja niiden todennäköisyydet. Tätä kutsutaan simuloinniksi, joka on tärkeää investointien kannattavuuden määrittämisessä varsinkin, jos on kyse

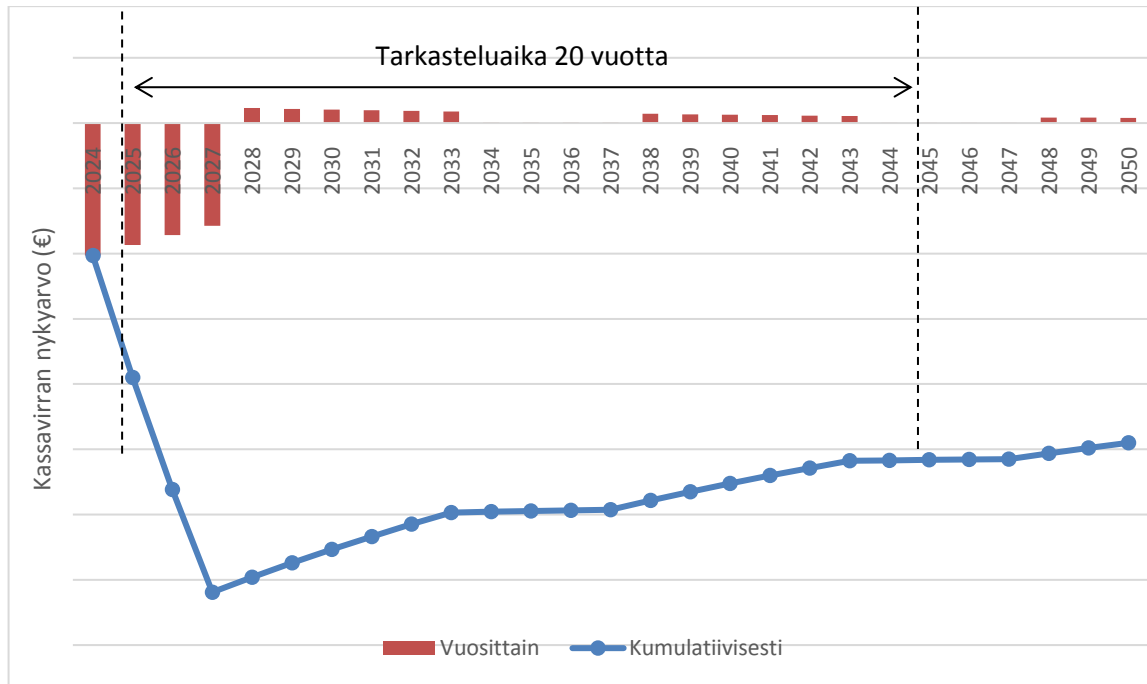
mallista, jossa eri lähtöarvojen keskinäiset riippuvuudet ovat monimutkaisia. (Suomala ym. 2011.)

8.2 Hiilimyllyjen investointi

Tällä hetkellä hiilimyllyjen uusiminen Helenin PTS:ssä on asetettu vuoteen 2024. Asiantuntijoiden mukaan teknisesti nykyiset hiilimyllyt ovat hyvässä kunnossa, jolloin asetettua investointiajankohtaa ei tässä tarkastelussa tarvitse ainakaan aikaistaa. Hiilimyllyjen investoinnin kannattavuutta lähdettiin selvittämään laskemalla nettonykyarvo uusille myllyille. Laskelmissa tarkasteltiin investoinnin kannattavuutta 20 vuoden ajanjaksossa, jolloin takaisinmaksuajaksi asetettiin 20 vuotta. Investointilaskenta suoritettiin ilman hankevarausta ja sisäisenä korkokantana käytettiin 5,0 %. Kustannusten arvo diskontattiin käyttäen 5,0 % laskentakorkokantaa. Laskelmat tehtiin liitteestä 4 löytyvän Microsoft Excel – ohjelmaan rakennetun laskentataulukon avulla, ja laskelmissa käytetyt lähtöarvot olivat Helenin käytäntöjen mukaisia. Myllyjen investoinnin kannattavuutta siis tarkasteltiin ajanjaksolla 2024–2044.

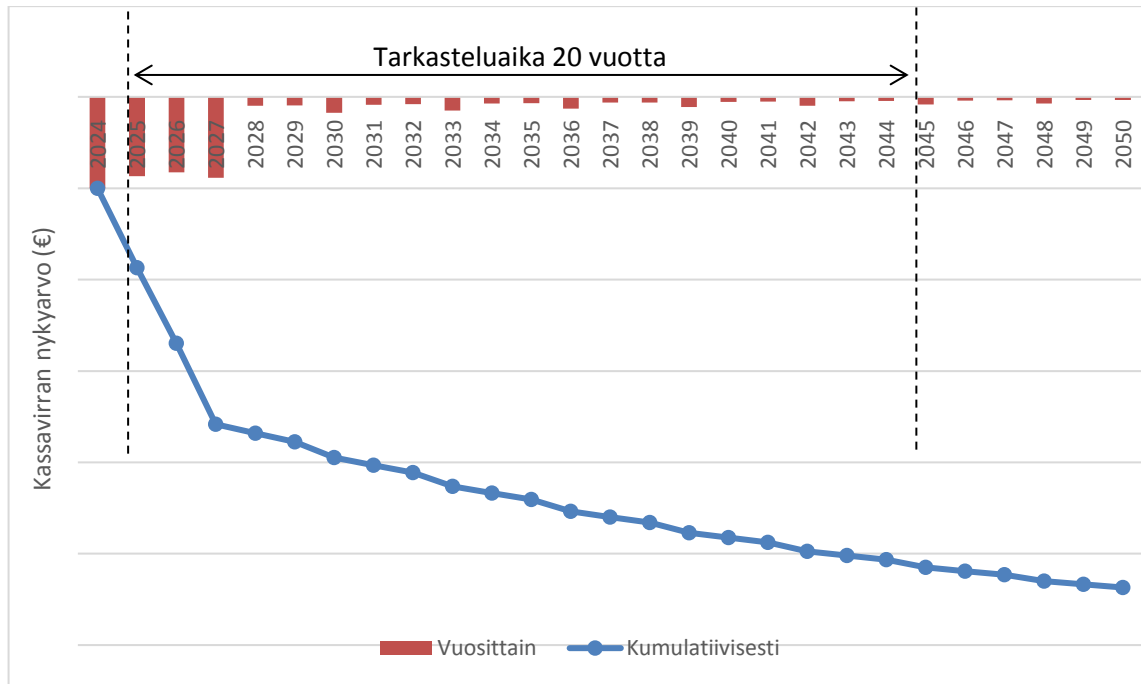
PTS:n mukaan myllyt olisi tarkoitus uusia ensimmäisen neljän vuoden aikana, 2024–2027, jolloin yksi mylly uusittaisiin vuosittain. Tämän vuoksi myllyjen investointikustannukset jaettiin vuosille 2024–2027. Menoihin laskettiin uuden myllyn kunnossapitokustannukset vuositasolla. Kunnossapitokustannukset eivät kuitenkaan ole samat joka vuosi, sillä myllyjen vuosittaiset kustannukset vaihtelevat jauhin- ja muiden kulutusosien vaihtamisen vuoksi. Myllyhuollon, jossa jauhinosat vaihdetaan, kustannukset ovat huomattavasti suuremmat verrattuna perinteisiin myllyhuoltoihin. Investoinnista aiheutuneet säästöt laskettiin vähentämällä nykyisiin myllyihin kohdistuneista vuosittaisista kustannuksista uusien myllyjen menot. Erotuksena saatiin vuosittainen säästö eli tulo, jonka avulla kurotaan kiinni investointikustannuksista aiheutunutta negatiivista kassavirran nykyarvoa. Investointilaskelmia varten pyydettiin budjettitarjoukset kolmelta myllytoimittajalta. Myllytoimittajat 1 ja 2 tekivät budjettitarjouksen valssimyllyistä, kun taas toimittaja 3 teki budjettitarjouksen kuularengasmyllystä. Investointilaskelmissa käytettiin myllytoimittajien arvioita uusien myllyjen kunnossapitokustannuksista ja kuvassa 6.4 esitettyjen vuosina 2003–2017 myllyihin kohdistuneiden kunnossapitokustannusten keskiarvoa. Investointilaskelmissa käytettiin myös myllytoimittajien sekä Helenin asiantuntijoiden arvioita huoltotöissä vaadittavista työtuntimääristä, jotka muutettiin työkuukausiksi Helen Oy Teknisten Palveluiden sisäisiä asennushinnastoja käyttäen.

Ensiksi tarkasteltiin valssimyllyjen investoinnin kannattavuutta, jos uudet myllyn hankittaisiin toimittajalta numero 1. Kassavirran nykyarvo ajan funktiona nähdään kuvassa 8.1. Toimittajan arvion mukaan kokonaisvaltaisten myllyhuoltojen huoltoväli oli noin 52500 tuntia, eli noin 10 vuotta tulevaisuuden vuosittaisen käyttöaikaennusteen ollessa 5400 tuntia. Kyseisissä myllyhuolloissa vaihdetaan myös jauhinosat. Huoltovälin arvioinnissa huomioitiin Salmisaareen tulleiden kivihiilitoimituksille tehtyjen polttoaineanalyysien tulokset tuhkapitoisuuksien sekä HGI-arvojen osalta. Kuvasta 8.1 havaitaan, että ensimmäisestä investointivuodesta alkaen 10 vuoden välein kassavirran kasvu heikkenee neljäksi vuodeksi johtuen jauhinosien korkeista kustannuksista. Suhteellisen pitkistä huoltoväleistä huolimatta, kassavirran nykyarvo jää kuitenkin negatiiviseksi 20 vuoden takaisinmaksuajalla. Voidaan siis sanoa, että investointi ei ole kannattava.



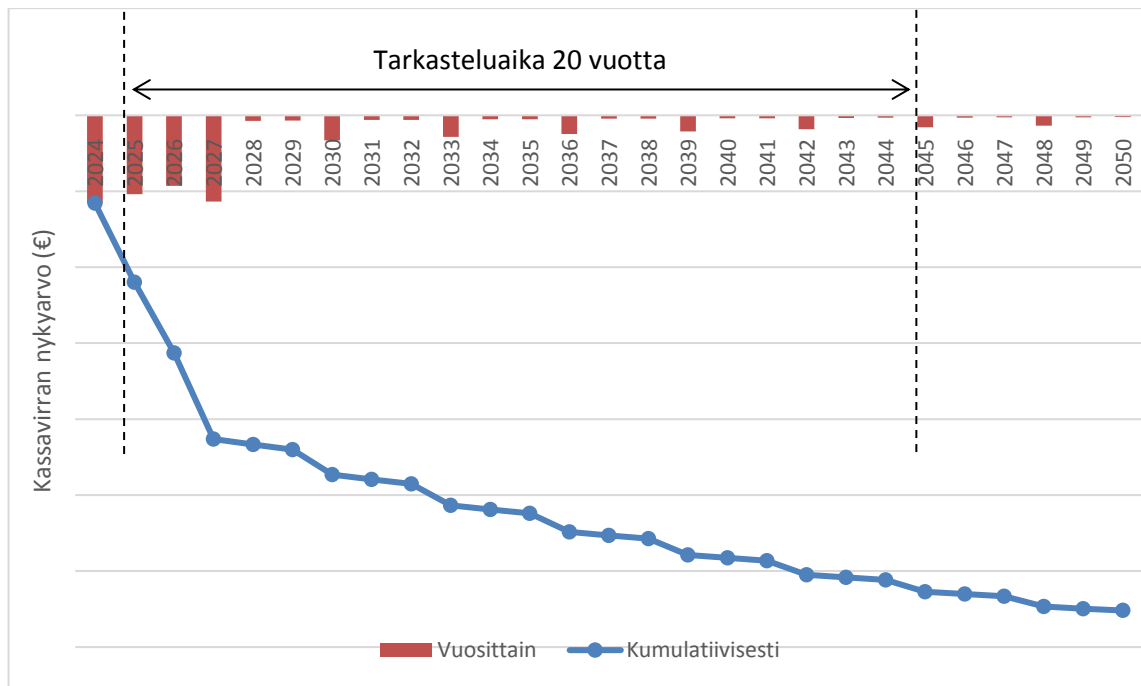
Kuva 8.1: Valssimyllyjen investoinnin kannattavuus, toimittaja 1.

Valssimyllyjen investoinnin kannattavuutta arvioitiin myös toisen myllytoimittajan antaman budjettitarjouksen ja kunnossapitokustannusarvioiden perusteella. Tämän investointilaskelman kassavirran nykyarvo nähdään ajan funktiona kuvassa 8.2. Toimittaja 2 ilmoitti, että myllyjen jauhinosisien vaihtoväli olisi arviolta noin 15600 tuntia eli 5200 tuntia vuositasona, joka on hyvin lähellä aiemmin käsiteltyä tulevaisuuden käyttöaikaennustetta. Tässäkin arvioissa huomioitiin polttoaineanalyysistä saadut tuhkapitoisuudet ja HGI-arvot. Kuvasta 8.2. nähdäänkin, että toimittajan 2 valssimyllyt vaativat enemmän investointeja käyttöönoton jälkeen, kuin toimittajan 1 valssimyllyt. Huoltovälin ollessa lyhempi, myllyyn joudutaan investoimaan arvokkaita kulutusosia useammin kuin toimittajan 1 valssimyllyihin. Toimittajan 2 valssimyllyt eivät investointilaskelman perusteella ole kannattavia 20 vuoden takaisinmaksuajalla. Mahdollinen investointi jatkaisi syöksyä eli aiheuttaisi negatiivista kassavirtaa ainakin vielä vuonna 2050.



Kuva 8.2: Valssimyllyjen investoinnin kannattavuus, toimittaja 2.

Kuularengasmyllyjen investoinnin kannattavuutta arvioitiin kolmannen myllytoimittajan antaman budjettitarjouksen ja kunnossapitokustannusarvioiden perusteella. Tämän investointilaskelman kassavirran nykyarvo nähdään ajan funktiona kuvassa 8.3. Toimittajan 3 arvio myllyjen huoltovälistä oli 16000 tuntia eli noin 5333 tuntia vuositasona. Arvio on hyvin lähellä aiemmin käsiteltyä tulevaisuuden käyttöaikaennustetta. Kuvassa 8.3 esitetään investointilaskelma kyseisen toimittajan kuularengasmyllyistä. Kuularengasmyllyn kunnossapitokustannukset ovat korkeammat kuin kummallakaan valssimyllyllä ja huoltoväli on toimittajan 2 tarjoaman valssimyllyn tapaan suhteellisen lyhyet verrattuna toimittajan 1 tarjoamaan valssimyllyyn. Investointilaskelman mukaan kuularengasmyllyihin investoiminen ei ole kannattavaa 20 vuoden takaisinmaksuajalla. Kuularengasmyllyillä olisi kuitenkin 20 vuoden kuluttua huomattavasti parempi nettonykyarvo kuin toimittajan 2 tarjoamilla valssimyllyillä, mutta tämä johtuu täysin siitä, että kuularengasmyllyjen budjettihinta on asennus- sekä käyttöönottokustannukset mukaan lukien huomattavasti pienempi kuin kummallakaan valssimyllytoimittajalla.



Kuva 8.3: Kuularengasmyllyjen investoinnin kannattavuus, toimittaja 3.

Valssimyllyjen budjettitarjouksissa oli mukana uudet kartioplaneettapyörävaihteistot ja tehokkaammat sähkömoottorit. Kuularengasmyllyn budjettitarjoukseen ei kuulunut uutta sähkömoottoria, mutta budjettitarjous sisälsi uudet kartiolieriöpyörävaihteistot. Nykyiset sähkömoottorit soveltuvat myös uusien kuularengasmyllyjen voimanlähteeksi ja ne ovat asiantuntijan mukaan hyvässä kunnossa (Mäki, 2017).

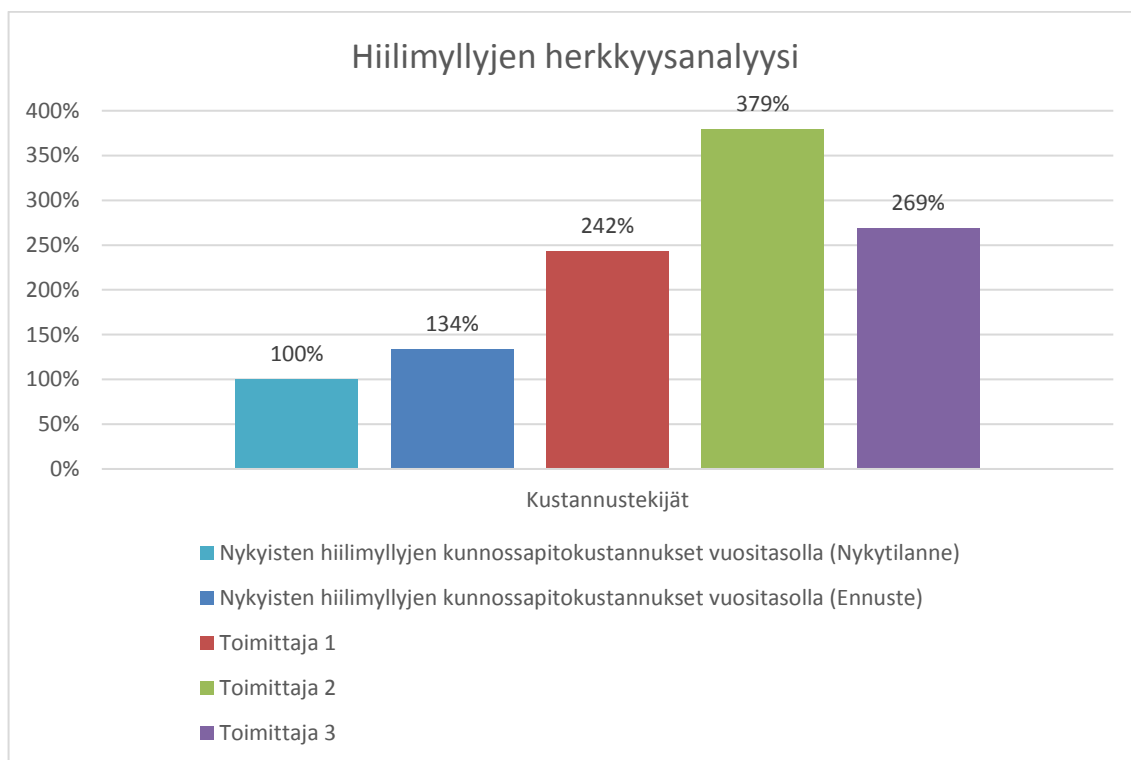
Toimittajan 1 valssimyllyt ovat varustettu 295 kW sähkömoottoreilla ja toimittajan 2 valssimyllyt ovat varustettu 355 kW sähkömoottoreilla, joiden sähkönkulutus on hieman suurempi kuin nykyisten 250 kW sähkömoottoreiden. 45 kW ja 105 kW tehoerot ovat kuitenkin hyvin marginaalinen osuus voimalaitoksen omakäyttötehosta, jonka vuoksi sen vaikutus käyttö- ja kunnossapitokustannuksiin on hyvin minimaalinen. Voimalaitoksen omakäyttöteho on noin 10 MW luokkaa. Valssimyllyt myös tarvitsevat enemmän kantoilmaa, jolloin nykyisten kantoilmapuhaltimien kapasiteetti ei välttämättä ole enää riittävä. Kantoilmapuhaltimien kapasiteetin kasvattamisella on myös hyvin marginaalinen vaikutus omakäyttötehoon. Mahdollinen kantoilmapuhaltimien investointitarve tulee kuitenkin ottaa huomioon laskelmissa, jos uudet valssimyllyt päätettäisiin hankkia. (Huovilainen, 2017.) Mikäli hiilimyllyt joskus uusittaisiin, myös myllyjen perustusten uudelleen rakentamisesta muodostuvat lisäkustannukset täytyisi ottaa huomioon (Luukko, 2017).

Investointilaskelmissa tarkastelluille hiilimyllyille tehtiin myös herkkyysanalyysi, jossa käytettiin jo aiemmin tehtyjä investointilaskelmia pohjana samoilla lähtöarvoilla ja samaa laskentataulukkoa käyttämällä (Liite 4). Herkkyytettäväksi parametriksi valittiin nykyiset hiilimyllyihin kohdistuvat kunnossapitokustannukset vuositasona. Myllyjen herkkyysanalyysin ideana oli etsiä kaikille kolmelle investoinnille ne kunnossapitokustannusten kustannustasot nykyisten myllyjen osalta, joilla kukin investointi olisi kannattava eli nettonykyarvo olisi 0 euroa takaisinmaksuajan päätyttyä. Uusien myllyjen kunnossapitokustannukset säilyivät samoina kuin investointilaskelmissa. Vuosina 1998–2016 myllyjen käyttötuntien keskiarvo on ollut noin 4036 tuntia vuodessa ja käyttöaikaennusteen mukaan myllyjä tullaan

käyttämään 5400 tuntia vuositasolla tulevaisuudessa. Tämän mukaan teoreettinen kustannustaso on noin 1,34-kertainen tulevaisuudessa verrattuna nykytasoon, laskenta nähdään kaavassa 8.1.

$$\text{Kustannustasokerroin} = \frac{5400 \text{ tuntia}}{4036 \text{ tuntia}} = 1,3379 \approx 1,34 \quad (8.1)$$

Kuvassa 8.4 esitetään hiilimyllyjen herkkyyssanalyysin tulokset prosentuaalisena vertailuna. Toimittajille 1, 2 ja 3 on laskettu ne kustannustasot, joihin nykyisten kunnossapitokustannusten tulisi kasvaa, jotta investointia voitaisiin pitää kannattavana. Vertailussa nykyiset hiilimyllyihin kohdistuvat kunnossapitokustannukset vuositasolla on merkitty vastaamaan 100 % osuutta kunnossapitokustannuksista. Analyysissä on myös esitetty ennuste kunnossapitokustannusten kustannustasosta nykyisille hiilimyllyille tulevaisuudessa. Jotta olisi kannattavaa hankkia uudet hiilimyllyt, tulisi olemassa oleviin hiilimyllyihin kohdistuneiden kunnossapitokustannusten olla vähintään 242 % nykytasosta eli kustannusten tulisi kasvaa noin 2,4-kertaisiksi. Tulevaisuudessa saattaa tapahtua kasvua hiilimyllyihin kohdistuneissa kunnossapitokustannuksissa kun käyttötunnit vuositasolla nousevat 4036 tunnista ennustettuun 5400 tuntiin. Tulevaisuuden kustannusten voidaan ennustaa olevan teoriassa noin 134 % nykytasosta, mikäli kasvu on suoraan verrannollinen käyttötunteihin nähden. Mahdollinen kasvu ei kuitenkaan herkkyyssanalyysin perusteella yllä edes edullisimman investoinnin tasolle, jotta toimittajan 1 tarjoamien valssimyllyjen hankinta olisi kannattava investointi.



Kuva 8.4: Hiilimyllyjen herkkyyssanalyysi kustannusten prosentuaalisena vertailuna.

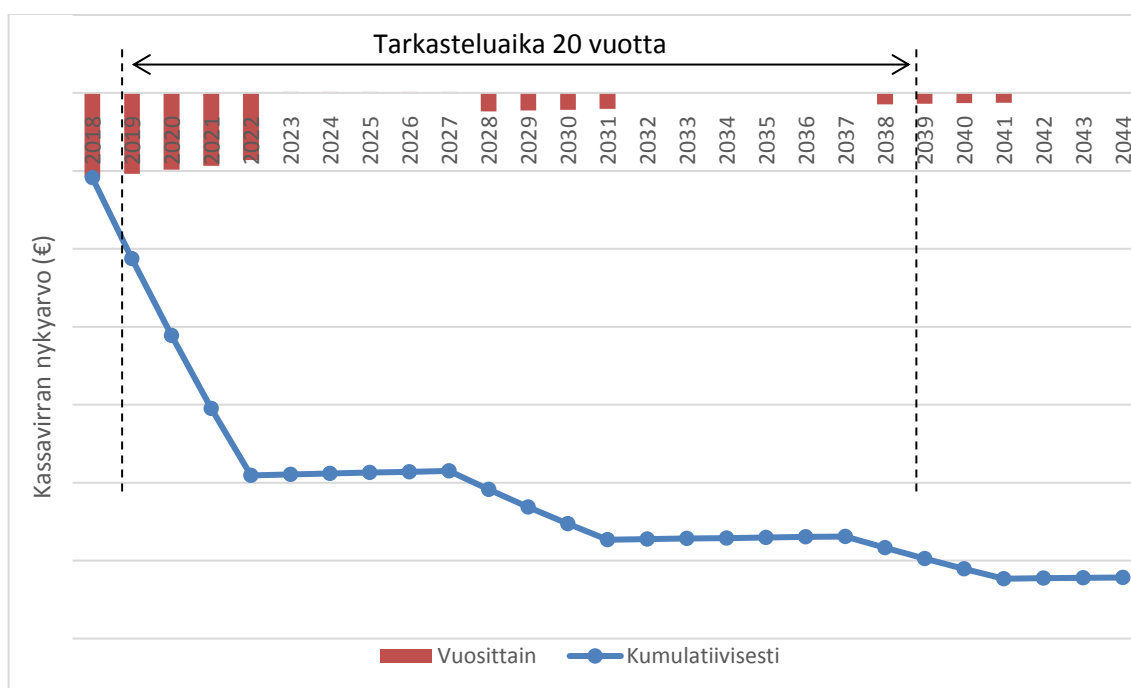
8.3 Vaihteistojen investointi

Vaihteistojen investoinnin kannattavuutta lähdettiin selvittämään laskemalla nettonykyarvo uusille vaihteistoille käyttäen samoja lähtöarvoja kuin hiilimyllyjenkin investointilaskelmissa. Investoitavien vaihteistojen lukumääräksi tässä tarkastelussa asetettiin viisi, perustuen nykyisten vaihteistojen lukumäärään, ja niiden investointikustannukset jaettiin vuosille

2018–2022. Toimittajat B ja D tarjosivat vaihteistoratkaisujaan sekä hitsatulla että valetulla kotelolla. Valetun kotelon ollessa halvempi vaihtoehto tarkasteltavan vaihteistolukumäärän mukaan, hitsattuja koteloja ei tässä tarkastelussa huomioitu. Kaikki vaihteistot ovat tyyppiltään kartiolieriöhammasvaihteistoja, koska tämän koko luokan planeettavaihteistoratkaisut olisivat mitoiltaan liian suuria olemassa olevien kuularengasmyllyjen vaihteistoiksi.

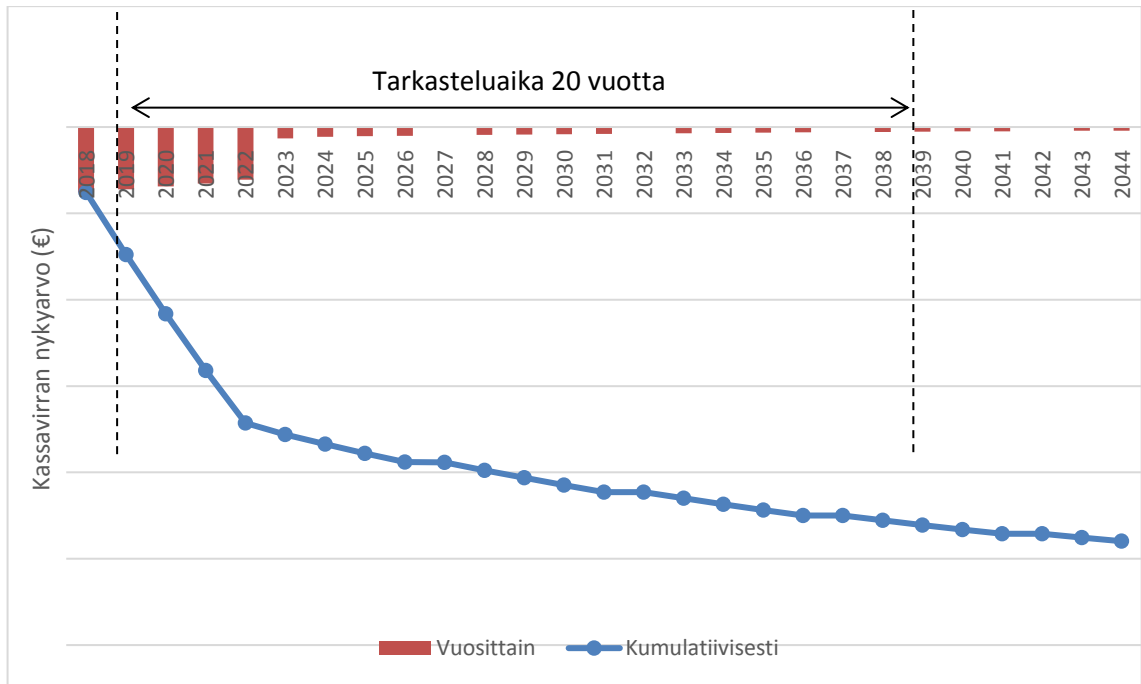
Menoihin laskettiin uusien vaihteistojen kunnossapitokustannukset vuositasolla ja ne jaettiin vuosille 2018–2021, koska käytössä on vain neljä vaihteistoa ja viides vaihteisto hankittaisiin varastoon varavaihteistoksi, jota sitten kierrätettäisiin tarpeen mukaan. Säästöt muodostuvat nykyisiin vaihteistoihin kohdistuvista vuosittaisista kustannuksista, joista vähennettiin uusien vaihteistojen aiheuttamat menot. Uusien vaihteistojen kunnossapitokustannukset vaihtelevat vuosittain niiden huoltovälien mukaisesti.

Ensiksi tarkasteltiin toimittajan A tarjoaman vaihteiston investoinnin kannattavuutta. Kassavirran nykyarvo ajan funktiona nähdään kuvassa 8.5. Toimittajan A arvion mukaan vaihteistojen huoltoväli on noin 10 vuotta. Kuvasta 8.5 havaitaan, että ensimmäisestä investointivuodesta alkaen 10 vuoden välein negatiivinen kassavirta kasvaa johtuen uusien vaihteistojen korkeista kunnossapitokustannuksista suhteessa tämän hetkisiin vaihteistojen kunnossapitokustannuksiin. Suhteellisen pitkästä huoltovälistä huolimatta, kassavirran nykyarvo jää kuitenkin negatiiviseksi 20 vuoden takaisinmaksuajalla. Voidaan siis sanoa, että investointi ei ole kannattava.



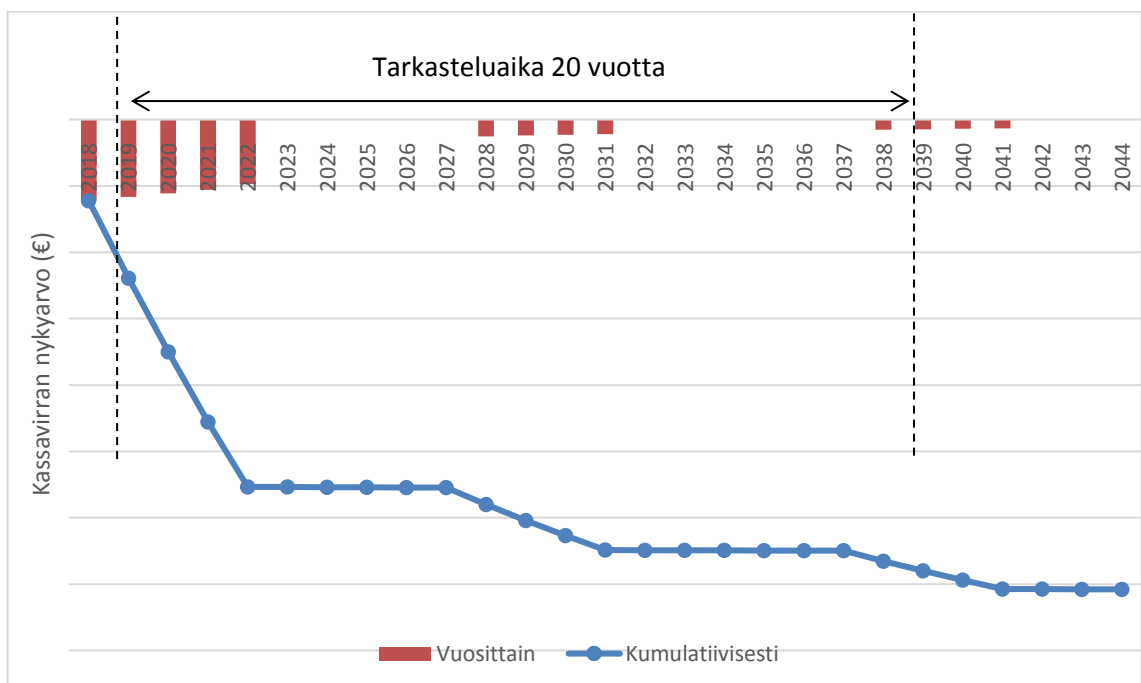
Kuva 8.5: Toimittajan A kartiolieriöhammasvaihteistojen investointilaskelma.

Seuraavaksi tarkasteltiin toimittajan B tarjoaman vaihteiston investoinnin kannattavuutta. Kassavirran nykyarvo ajan funktiona nähdään kuvassa 8.6. Toimittajan B arvion mukaan vaihteistojen huoltoväli on noin 5 vuotta. Toimittajan A tarjoamien vaihteistojen tavoin myös toimittajan B tarjoamien vaihteistojen suhteellisen korkeiden kunnossapitokustannusten vuoksi, kassavirran nykyarvo jää kuitenkin negatiiviseksi 20 vuoden takaisinmaksuajalla, jolloin investointi ei ole kannattava.



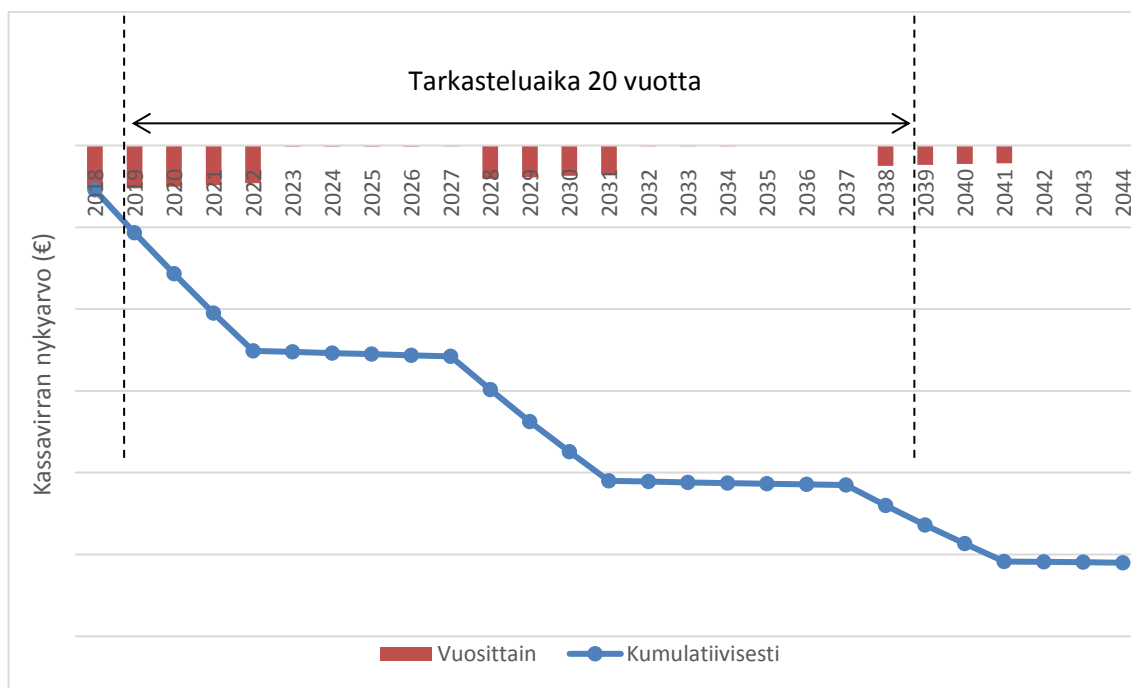
Kuva 8.6: Toimittajan B kartiolieriöhammasvaihteistojen investointilaskelma valetulla kotelolla.

Kolmantena vaihtoehtona tarkasteltiin toimittajan C tarjoaman vaihteiston investoinnin kannattavuutta. Kassavirran nykyarvo ajan funktiona nähdään kuvassa 8.7. Toimittajan C arvion mukaan vaihteistojen huoltoväli on noin 10 vuotta. Myös toimittajan C tarjoamien vaihteistojen kunnossapitokustannukset ovat suhteellisen korkeat aivan kuten toimittajan A ja B tarjoamissa vaihteistoissa. Investointilaskelman lopputuloksena kassavirran nykyarvo jää negatiiviseksi 20 vuoden takaisinmaksuajalla, jolloin investointi ei ole kannattava.



Kuva 8.7: Toimittajan C kartiolieriöhammasvaihteistojen investointilaskelma.

Viimeisenä vaihtoehtona tarkasteltiin toimittajan D tarjoaman vaihteiston investoinnin kannattavuutta. Kassavirran nykyarvo ajan funktiona nähdään kuvassa 8.8. Toimittajan D arvion mukaan vaihteistojen huoltoväli on noin 10 vuotta. Aivan kuten toimittajien A, B ja C tapauksissa, niin myös tässä kunnossapitokustannukset ovat suhteessa niin korkeat nykyisiin kustannuksiin verrattuna, ettei tämäkään investointi ole kannattava 20 vuoden takaisinmaksuajalla tarkasteltaessa.



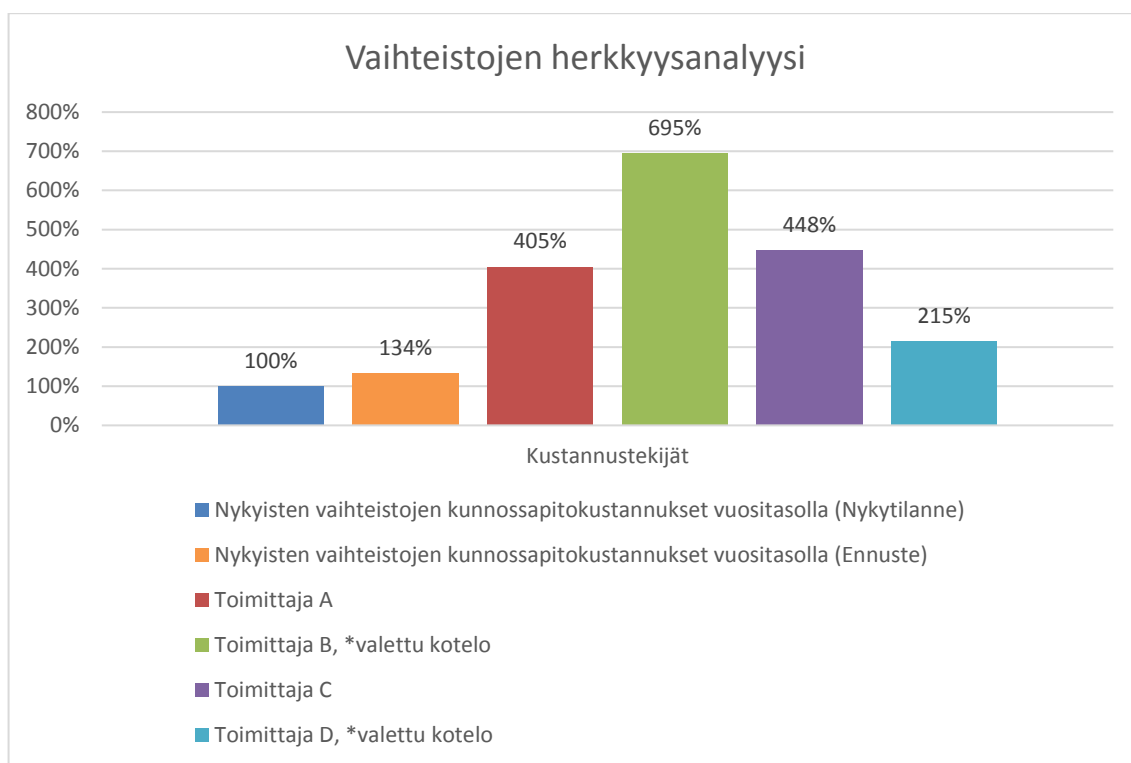
Kuva 8.8: Toimittajan D kartiolieriöhammasvaihteistojen investointilaskelma valetulla kotelolla.

Investointilaskelmien kuvaajista nähdään, että uusien vaihteistojen kunnossapitokustannukset ovat vain hieman nykyisiä kunnossapitokustannuksia alhaisempia. Tästä syystä uusien vaihteistojen hankkiminen ei ole taloudellisesti kannattavaa lukumäärästä riippumatta. Näin ollen, edes yksittäisen varavaihteiston hankinta ei olisi kannattavaa.

Vaihteistojen investoinnin kannattavuutta tarkasteltiin myös herkkyysanalyysin kautta, jossa käytettiin jo aiemmin tehtyjä investointilaskelmia pohjana samoilla lähtöarvoilla. Herkkyystettäväksi parametriksi valittiin nykyiset vaihteistoihin kohdistuvat kunnossapitokustannukset vuositasona. Vaihteistojen herkkyysanalyysin tarkoituksena oli etsiä ne kunnossapitokustannusten kustannustasot nykyisten vaihteistojen osalta, joilla toimittajien A, B, C ja D tarjoamien vaihteistojen investoinnit olisivat kannattavia. Analyysi toteutettiin samalla tavalla kuin hiilimyllyjen tapauksessa investointilaskentataulukon avulla (Liite 4). Uusien vaihteistojen kunnossapitokustannukset säilyivät samoina kuin investointilaskelmissa. Kuvassa 8.9 esitetään vaihteistojen herkkyysanalyysin tulokset prosentuaalisena vertailuna.

Vertailussa nykyiset vaihteistoihin kohdistuvat kunnossapitokustannukset vuositasona merkittiin vastaamaan 100 % osuutta kunnossapitokustannuksista. Jotta olisi kannattavaa investoida uusiin vaihteistoihin, tulisi olemassa oleviin vaihteistoihin kohdistuneiden kunnossapitokustannusten olla vähintään 215 % nykytasosta eli kustannusten tulisi kasvaa noin 2,2-kertaisiksi. Tulevaisuudessa saattaa tapahtua kasvua myös vaihteistoihin kohdistuneissa kunnossapitokustannuksissa kun myllyjen käyttötunnit kasvavat. Tulevaisuuden kustannus-

ten voidaan ennustaa olevan hiilimyllyjen tapaan noin 134 % nykytasosta, mikäli vaihteistokoteloja sekä segmenttilaakereita jouduttaisiin korjaamaan jokaisessa vaihteistohuollossa. Mahdollinen kasvu ei kuitenkaan herkkyyksianalyysin perusteella yllä edes edullisimman investoinnin tasolle, jotta toimittajan D tarjoamat vaihteistot olisi kannattavaa investoida.

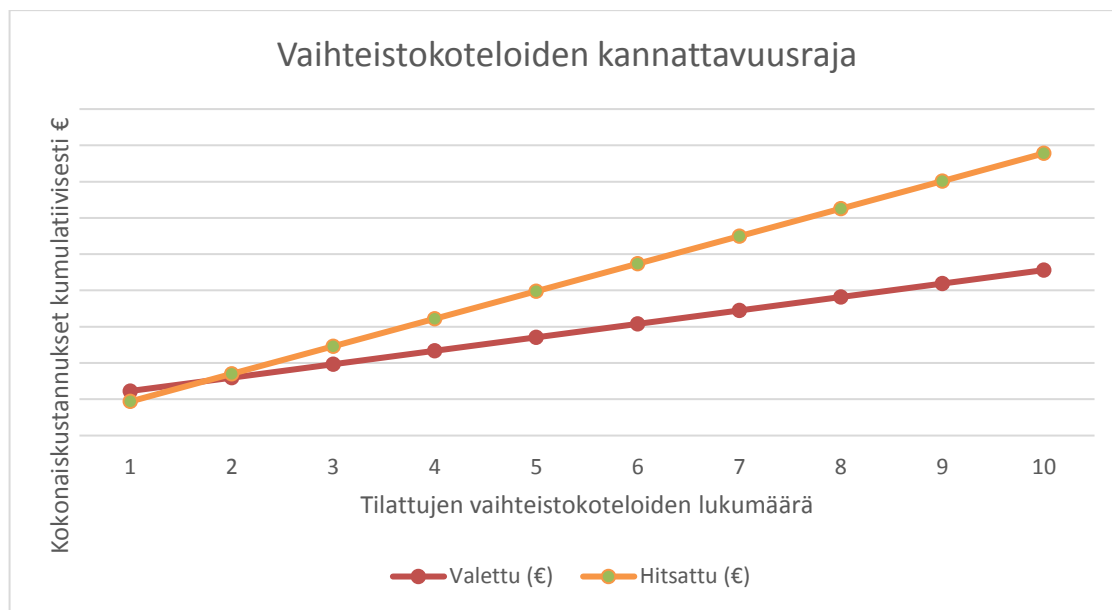


Kuva 8.9: Vaihteistojen herkkyyksianalyysin tulos kustannusten prosentuaalisena vertailuna.

8.4 Vaihteistokoteloiden investointi

Vaihteistokoteloiden valmistustapaa valittaessa on tärkeää laskea kannattavuusraja, joka tässä tapauksessa määrittää sen vaihteistokoteloiden lukumäärän, jolla valettu kotelo on edullisempi vaihtoehto kuin hitsattu. Kannattavuusraja perustuu valetun ja hitsatun kotelon kustannusrakenteisiin sekä niistä muodostuviin yksikköhintoihin. Valetun kotelon kustannusrakenne pitää sisällään kotelon mitoituksen ja suunnittelun, valumallin sekä kotelon valmistuskustannukset. Hitsatun kotelon kustannusrakenne pitää sisällään kotelon mitoituksen ja suunnittelun sekä kotelon valmistuskustannukset. Kustannusrakenteiden erona on siis valumallista aiheutuvat kustannukset, jonka vuoksi valetun kotelon yksikköhinta luonnollisesti laskee koteloiden lukumäärän kasvaessa, koska yhdestä valumallista voidaan valmistaa useampi kotelo. Korkeista valumallin kustannuksista johtuen yleensä yksittäiset kotelot on edullisempi valmistaa hitsaamalla.

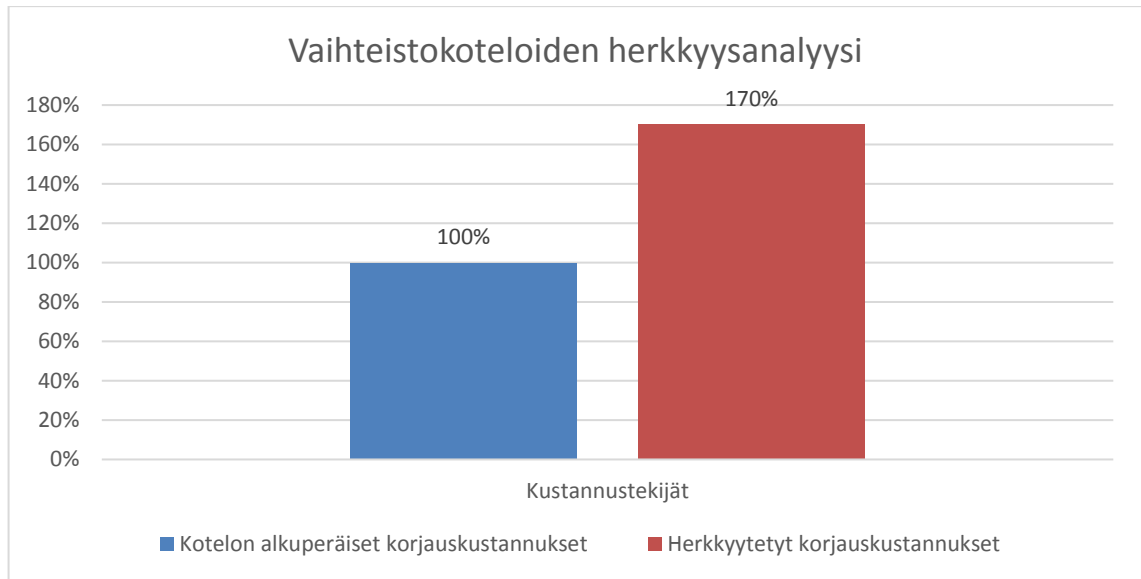
Kuvasta 8.10 nähdään, että valmistettaessa kaksi kappaletta vaihteistokoteloita nykyisten vaihteistojen mittojen mukaisesti, valettu kotelo on jo aavistuksen edullisempi. Kannattavuusraja on poikkeuksellisen alhainen, johtuen hitsatun kotelon tavanomaista korkeammista kustannuksista. Poikkeuksellisen korkeisiin kustannuksiin vaikuttavat hitsatussa kotelossa käytettävät teräsmateriaalit, joiden markkinahinta on tällä hetkellä korkea (Kauppinen, 2017.)



Kuva 8.10: Vaihteistokoteloiden kannattavuusraja (Lampinen, 2017).

Helenin tapauksessa tarkasteltiin vaihteistokoteloiden investoinnin kannattavuutta herkkyysanalyysin kautta. Kannattavuutta ei laskettu perinteisen investointilaskelman avulla, koska korjattujen vaihteistokoteloiden uudelleen vikaantumisen ajankohdasta ei ole olemassa ennustetta. Analyysissa käytetyt lähtöarvot olivat samoja kuin hiilimyllyjen ja vaihteistojen investointilaskelmissa ja herkkyysanalyysissä, sekä analyysi tehtiin aiempien herkkyysanalyysien tapaan investointilaskentataulukon avulla (Liite 4). Investoitavien koteloiden lukumääräksi valittiin neljä, sillä yksi kotelo on juuri korjattu. Asiantuntijan arvion mukaan korjattu kotelo ei tule vikaantumaan lähivuosina (Luukko, 2017). Valitun lukumäärän ja kuvan 8.10 perusteella valetun kotelon ollessa edullisempi, herkkyysanalyysi tehtiin käyttäen neljän valetun kotelon yksikköhintaa vuosittaisena investointikustannuksena ensimmäisen neljän vuoden ajan. Käyttö- ja kunnossapitokustannukset eli menot ovat tässä tapauksessa 0 euroa, koska investoinnin oletuksena on, että uusia keloita ei tarvitse korjata. Säästöillä tarkoitetaan nykyisten koteloiden korjaamisen kohdistuvia kustannuksia vuositasolla. Säästöt ovat herkkyyttävä parametri, jota muuttamalla etsittiin sille arvo, jolla investoinnin nettonykyarvo on 20 vuoden kuluttua 0 euroa. Tällöin investointia voidaan pitää kannattavana. Herkkyyttävä parametri asetettiin vuosittaiseksi vakiosäästökseksi, eikä herkkyysanalyysissä arvioitu säästöjen mahdollisia muutoksia vuosittain.

Tässä herkkyysanalyysissä oletettiin, että vaihteistokoteloihin kohdistuvat kustannukset jakaantuisivat tasaisesti vuosittain. Kuvassa 8.11 nähdään herkkyysanalyysin tulos kustannusten prosentuaalisena vertailuna. Kotelon alkuperäisillä korjauskustannuksilla tarkoitetaan syksyllä 2017 korjatun kotelon korjauskustannuksia. Herkkyytetty korjauskustannukset ilmaisevat vuosittaista kustannustasoa, joka nykyisiin koteloihin kohdistuvien vuosittaisten kustannusten tulisi saavuttaa, jotta investointi olisi kannattava. Tulokset kertovat, että nykyisiin koteloihin kohdistuneiden vuosittaisten kustannusten tulisi olla 170 % kotelon alkuperäisistä korjauskustannuksista eli 1,7-kertaiset.



Kuva 8.11: Herkkyysanalyysin tulos kustannusten prosentuaalisena vertailuna.

9 Tulosten tarkastelu ja pohdinta

9.1 Riskit

Riskien arvioinnin tulosten perusteella voidaan sanoa, että hiilimyllyjen modernisoinnilla ei saada pienennettyä riskejä juuri yhtään talouden, käytettävyyden ja turvallisuuden osa-alueilla. Hiilimyllyjen häiriöt johtuvat usein myllystä riippumattomista syistä, kuten kytöpa-loista, vieraiden esineiden päätyemisestä myllyyn tai myllyn oheislaitteiden ongelmista. Näitä ongelmia ei voida merkittävästi vähentää myllytyyppiä muuttamalla tai investoimalla uusiin samantlaisiin kuularengasmyllyihin

Hiilimyllyjen alhaiset riskitasot eri osa-alueilla johtuvat varamyllyn olemassaolosta. Hiilimyllyjen vikaantuminen ei aiheuta merkittäviä energianhankinnan lisäkustannuksia, käytettävyyso ongelmia tai turvallisuusriskejä, sillä aina yhden myllyn tai sen oheislaitteiden vikaantuessa, voidaan ottaa käyttöön varamylly. Mikäli useampi mylly tai myllyn oheislaitteet vikaantuu tai on huollossa samaan aikaan kun häiriö ilmenee, edellä mainittuja ongelmia saat-taa ilmaantua. Energianhankinnan lisäkustannuksia saattaa muodostua myös tilanteissa, jos yksi tai useampi mylly vikaantuu, kun voimalaitosta ajetaan neljällä myllyllä huonolaatuisen hiilen vuoksi.

9.2 Investoinnin kannattavuus

Investointilaskelmien perusteella voidaan todeta, että hiilimyllyjen sekä niiden vaihteistojen modernisointi ei ole taloudellisesti kannattavaa. Herkkyysanalyysien tulokset myllyjen ja vaihteistojen osalta osoittavat, että nykyisten kunnossapitokustannusten täytyisi moninker-taistua, jotta investointeja voitaisiin pitää kannattavina. Voidaan pitää epätodennäköisenä, että hiilimyllyihin kohdistuvat kustannukset tulisivat nousemaan 2,4-kertaisiksi nykyisestä, koska kuvassa 6.4 esitetyssä vuotuisten kunnossapitokustannusten ennusteessa ei ole havait-tavissa kasvua vuosien 2017–2030 välisenä aikana. Hiilimyllyjen modernisoinnin ollessa kannattamatonta, tässä työssä ei tutkittu myllyjen perustuksista mahdollisesti aiheutuvia li-säkustannuksia. Lisäksi mahdollisesti suurempi tehoisten myllymoottorien aiheuttamia muutoksia sähköjärjestelmissä sekä suurempi kapasiteettisten myllyilmapuhaltimien han-kintaa ei otettu huomioon investointilaskelmissa edellä mainitusta syystä.

Valssimyllyjen edullisuus kunnossapitokustannuksiensa puolesta on hieman ristiriidassa lu-vussa 3.1.2 esitetyn teorian kanssa, jonka mukaan valssimyllyjen kunnossapitokustannukset ovat alhaisemmat kuin kuularengasmyllyillä. Toimittajan 1 valssimylly on huomattavasti edullisempi huoltaa kuin kuularengasmylly, mutta toimittajan 2 valssimyllyssä kunnossapi-tokustannukset eivät ole merkittävästi kuularengasmyllyn kunnossapitokustannuksia alhai-sempia. Investointilaskelmien kannattavuuksissa on tietenkin jonkin verran virhemarginaa-lia ottaen huomioon, että varsinkin myllyjen asennus- ja käyttöönottokustannuksia on toi-mittajien hyvin vaikea arvioida käymättä paikan päällä. Myös kunnossapitokustannusten suuruus saattaa vaihdella huoltotyössä tapahtuvien inhimillisten virheiden sekä vaihtelevan kulumisen mukaan. Vaihteleva voi johtua muun muassa polttoaineista ja niiden koostu-muksista, esimerkiksi puuaineksen lisääminen jauhettavassa polttoaineseoksessa pidentää jauhinosien kestoikää. Vaihtelevaan kulumiseen vaikuttavat myös myllyyn päätyvät ei-toi-votut esineet, jotka saattavat läpäistä polttoaineen käsittelyn aina polttoainevarastosta myl-lyille saakka.

Vaihteistojen modernisoinnin kannattavuutta edellyttävän vaihteistoihin kohdistuneiden kunnossapitokustannusten tuplaantumista ei myöskään voida pitää kovin todennäköisenä, koska vaihteistojen ongelmat liittyvät ainoastaan kotelon ja segmenttilaakerien vikaantumiseen. Muut laakerit ja akselit sekä hammasrattaat ovat säilyneet määräykset täyttävässä kunnossa jo pitkään. Vaikka kotelot ja segmenttilaakerit vikaantuisivat tulevaisuudessa entistä useammin, niihin kohdistuneiden kunnossapitokustannusten määrä ei todennäköisesti kasvattaisi vaihteistoihin kohdistuvia kokonaiskunnossapitokustannuksia 2,2-kertaisiksi nykyisestä tasosta. Lisäksi toimittajan D budjettihinta koskee räätälöityä vaihteistoa, jolloin täytyy ottaa huomioon mahdolliset muutokset investointikustannuksissa. Investointikustannusten ei ainakaan odoteta laskevan, sillä muiden vaihteistotoimittajien antamat budjettihinnat olivat merkittävästi korkeampi. Mahdollisesti kasvavat investointikustannukset huonontaisivat investoinnin kannattavuutta entisestään. Kuten jo luvussa 8 mainittiin, uusien vaihteistojen kunnossapitokustannukset eivät ole merkittävästi alhaisempia kuin nykyiset kunnossapitokustannukset, jonka vuoksi uusien vaihteistojen hankkiminen ei ole taloudellisesti kannattavaa lukumäärästä riippumatta. Tästä syystä edes yksittäisen varavaihteiston hankinta ei olisi taloudellisesti kannattavaa.

Vaihteistokoteloiden investoinnin kannattavuutta tarkasteltiin ainoastaan herkkyysanalyysin kautta. Analyysin tulokset osoittavat, että vaikka yksi kotelo korjattaisiin vuosittain, ei se luvussa 6.4 läpikäytyjen kotelovaurioiden tasolla tee uusien hankkimisesta kannattavaa. Mikäli koteloja jouduttaisiin korjaamaan useammin kuin yksi kotelo per vuosi – tahdilla tai kotelovauriot olisivat merkittävästi vakavampia, saattaisi uusiin vaihteistokoteloihin investoiminen olla kannattavaa. Ehtoina kuitenkin ovat, että korjaamiseen käytettävien kustannusten tulisi kasvaa 70 % syksyllä 2017 korjatun kotelon korjauskustannuksista ja koteloja korjattaisi vähintään yksi kotelo vuodessa tai kotelo vaurioituisi niin pahasti, ettei sitä ole mahdollista enää korjata. Koteloiden hankinnan muuttumista kannattavaksi voidaan pitää epätodennäköisenä, sillä kunnes kaikki vaihteistokotelot on saatu korjattua, vaihteistoihin kohdistuvat kustannukset koteloiden korjaamisen osalta laskevat.

Niin hiilimyllyjen, kuten vaihteistojen sekä vaihteistokoteloiden hankintapäätöksissä täytyy ottaa huomioon mahdollisten kunnossapitokustannusten nousu tulevaisuudessa kasvavien käyttötuntien myötä. Tulevaisuuden käyttötuntiennusteessa käyttötuntien keskiarvo kasvaa 34 %. Kunnossapitokustannusten ei voida kuitenkaan olettaa kasvavan lineaarisesti käyttötuntien myötä, vaikka kulutusosiin kohdistuvat kustannukset kasvaisivatkin.

9.3 Johtopäätökset

Tutkimus osoittaa, että hiilimyllyt ovat hyvässä kunnossa ja niihin kohdistuvissa kunnossapitokustannuksissa ei ole odotettavissa merkittävää kasvua vuoteen 2030 mennessä. Hiilimyllyjen modernisointi ei myöskään ole kannattavaa riskienhallinnan tai investoinnin kannattavuuden näkökulmista, eikä sen uskottaisi vaikuttavan vikaantumistaajuuden muuttumiseen merkittävästi. Hiilimyllyillä on hyvä käytettävyyden ja valtaosa käytön ongelmista ovat myllystä riippumattomia. Ehkäisemällä hiilen mukana tulevien joukkoon kuulumattomien metallien sekä muiden jätteiden pääsyä hiilenjakajaan ja hiilimyllyyn, voitaisiin vähentää toimintahäiriöitä myllyssä. Lisäksi puhtaampi raakamateriaali jauhatuksessa aiheuttaisi vähemmän kulumista jauhinosisissa ja saattaisi täten laskea kunnossapitokustannuksia.

Vaihteistot ovat hyvässä kunnossa segmenttilaakereita ja vaihteistokoteloja lukuun ottamatta. Segmenttilaakerien vikaantumisen merkittävimpana juurisyynä voidaan pitää hydrodynaamisen voitelumenetelmän aiheuttamaa laakerien liukupintojen kuivumista vaihteiston

pysähtyessä. Segmenttilaakerien kestävyyttä parantamaan ruiskutetun uuden pinnoitteen ja koneistettujen voiteluöljytaskujen kestävyys ja toimivuus käytännössä saadaan selville muutamana vuoden kuluessa. Uudelleenpinnoitettujen ja koneistettujen laakereiden uskotaan laskevan vaihteistojen vikaantumistaajuutta, kunhan vain kiinnitetään huomioita myllyn käynnistysprosessiin ja vältetään myllyn käynnistämistä lastin kanssa. Mikäli tämä ei takaa haluttua kestävyyttä laakereille, täytyy tulevaisuudessa harkita voitelumenetelmän muuttamista hydrostaattiseksi, jolloin segmenttilaakereihin saataisiin kevennysöljyjärjestelmä. Vaihteistokoteloiden ongelmat ja niiden aiheuttamat kustannukset huomioiden uusien vaihteistojen hankinta ei ole kannattavaa investointilaskelmien tai riskienhallinnan näkökulmista. Myöskään yksittäisen varavaihteiston hankkiminen ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Vaihteistokoteloiden vikaantuminen on selkeästi ongelma, johon tässä tutkimuksessa etsittiin ratkaisua. Herkkyysanalyysin tulosten perusteella uusien vaihteistokoteloiden hankkiminen ei kuitenkaan ole kannattavaa syksyllä 2017 korjatun vaihteistokotelon korjauskustannuksiin nähden. Tikkausmenetelmällä korjatun kotelon vikaantumistaajuuden uskotaan laskevan, eikä kotelo ainakaan vikaannu herkästi samoista kohdista uudelleen. Vaihteistokotelon uudelleen vikaantumista voidaan kuitenkin pitää mahdollisena, sillä kotelon designissa on valuteknisestä näkökulmasta havaittavissa selkeitä virheitä. Kotelossa on kauttaaltaan liikaa teräviä kulmia eikä sen suunnittelussa ole huomioitu pyöristysten tärkeyttä. Kotelossa on myös useita massakeskittymiä, joiden vuoksi kotelo ei valusimulaation tulosten perusteella jähmety riittävän tasaisesti aiheuttaen koteloon hauraita kohtia, jotka vikaantuvat herkästi. Vaikka kotelon valuteknistä designia voidaan pitää merkittävimpana juurisyynä koteloiden vikaantumiselle tämän tutkimuksen pohjalta, täytyy kuitenkin lähitulevaisuudessa tutkia vaihteistojen pedit uudelleen, suorittaa värähtelymittaukset ja tarvittaessa injektoida perustusten betonirakenteet. Hiilimylly 3 huollon yhteydessä koneistetun pedin tasaisuus oli merkittävästi vaihteistotoimittajan asennustoleranssien ulkopuolella ennen koneistusta, joka antaa aiheutta uudelleen tarkastelulle.

Tämän diplomityön lopputuloksena voidaan sanoa, että uusia hiilimyllyjä, vaihteistoja tai vaihteistokoteloita ei ole kannattavaa hankkia teknistaloudellisesta näkökulmasta Helenin strategiset tavoitteet huomioiden. Käytössä olevat vaihteet tulee ottaa huoltoon, kun öljyanalyysissä ilmenee korkeita valkometallipitoisuuksia ja suorittaa segmenttilaakereille samantyyppiset pinnoitus- ja koneistustoimenpiteet kuin syksyllä 2017 pinnoitetuille laakereille. Huollon yhteydessä vaihteistokoteloiden vauriot ovat korjattava tikkausmenetelmällä ja epoksi-pohjaisella komposiittiseoksella. Myös päätyporausta voidaan käyttää säröjen ollessa päätyporaukseen soveltuvia. Tämän tutkimuksen pohjalta voidaan sanoa, että hiilimyllyjen vaihteistojen ja vaihteistokoteloiden vikaantumistaajuus ja kunnossapitokustannukset eivät merkittävästi kasva vuoteen 2030 mennessä.

Tutkimusta hankaloitti hiilimyllyjen ja niiden vaihteistojen häiriöiden puutteellinen raportointihistoria, jonka takia myllyjen ja vaihteistojen vikaantumistaajuutta ei ollut mahdollista arvioida tilastollisesti. Tämän vuoksi vikaantumistaajuuksien arvioinneissa käytettiin apuna asiantuntijoita, jotka ovat Helenin palveluksessa.

9.4 Jatkotutkimusehdotukset

Tämän diplomityöprosessin aikana kävi ilmi, että puupellettien seospolton vaikutusta vaihteisto-ongelmiin ei ole tutkittu riittävästi. Osa asiantuntijoista pitää mahdollisena, että puupellettien seospolton myötä pellettien jauhatus hiilen seassa on saattanut lisätä vaihteisto-

ongelmia. Suurin osa asiantuntijoista on kuitenkin sitä mieltä, että vaihteisto-ongelmien lisääntymisestä puupellettien seospolton myötä ei ole riittävästi näyttöä. Tätä olisi syytä tutkia tarkemmin. Mikäli pellettien ja hiilen yhteisjauhatukselle löydettäisiin yhteys vaihteistojen vikaantumiseen, olisi vaihteisto-ongelmia mahdollista ehkäistä tulevaisuudessa muun muassa hiilimyllyjen käytönohjauksen, erilaisten laakerointiratkaisujen sekä kevennysöljyjärjestelmän avulla. Vaihteisto-ongelmien vähentymisen myötä saataisiin alennettua vaihteistoihin kohdistuvia kunnossapitokustannuksia ja parannettua voimalaitoksen käytettävyyttä.

Vaihteistopetien vaikutuksia vaihteistojen vikaantumiseen tulisi tutkia tarkemmin, sillä kesällä 2017 suoritettun vaihteistohuollon yhteydessä koneistetun pedin tasaisuudessa havaittiin vaihteistotoimittajan asennustoleranssien ylittäviä arvoja. Viimeisimmästä värähtelymittauksesta, joka suoritettiin vuonna 2004, on jo niin pitkä aika, että olisi hyvä tutkia pedit uudelleen. Mikäli pedeissä havaitaan asennustoleranssien ylittäviä arvoja, olisi syytä tutkia hiilimyllyjen perustukset perusteellisesti ja tarvittaessa injektoida vaurioituneet betonirakenteet.

Vaihteistokotelon vaurioiden materiaaalitekkinen tarkastelu rajattiin tämän työn ulkopuolelle, koska sitä ei ollut mahdollista tutkia syksyllä 2017 suoritettun vaihteistohuollon yhteydessä. Säröjen materiaaalitekkinen tarkastelu olisi tärkeää vaihteistokotelon vikaantumisen aiheuttavien juurisyyden tutkimisessa. Tarkastelun avulla saataisiin tietoa siitä, millaisilla vauriomekanismeilla säröt ovat koteloihin muodostuneet. Vauriomekanismeilla tarkoitetaan muun muassa materiaalin väsymistä ja virumista, kappaleessa tapahtuvia plastisia muodonmuutoksia, hauraita murtumia sekä ympäristönvaikutuksista aiheutuvia vaurioita. Vauriomekanismin selvittyä olisi helpompi miettiä ehkäisykeinoja vaihteistokoteloiden vikaantumisten välttämiseksi.

Häiriöraportoinnin puutteellisuus hankaloitti tämän diplomityön tekemistä selvästi. Hiilimyllyjen ja vaihteistojen vikaantumisia ei tällä hetkellä raportoida riittävästi, joka näkyy jopa vuosien mittaisina aukkoina vikaantumistilastoissa. Puutteellisen raportoinnin yhtenä syynä voidaan pitää varamyllyä, jonka käyttöönottoa ei raportoida myllyhäiriöksi vaikka yksi käynnissä olevasta kolmesta myllystä pysähtyisi häiriönomaisesta syystä. Häiriöraportointiin tulisi jatkossa kiinnittää enemmän huomioita koko voimalaitoksen tasolla, eikä varajärjestelmien, kuten varamyllyn, olemassa olo saisi vähentää pääjärjestelmissä aiheutuvien häiriöiden raportointia. Asiallinen ja luotettava häiriöraportointi auttaisi järjestelmien kunnossapidon ennakoinnissa sekä modernisointien yhteydessä tehtävissä teknistaloudellisissa tarkasteluissa.

10 Yhteenveto

Tässä diplomityössä tutkittiin teknistaloudellisesti eri toteutustapoja hiilimyllyjen vaihteistojen korjaamiselle, uusimiselle tai vaihtoehtoisesti uusien hiilimyllyjen hankkimiselle. Tutkimuksessa otettiin myös huomioon voimalaitoksen pitkän tähtäimen suunnitelmat sekä Helenin strategiset tavoitteet ilmastoneutraalisuuden suhteen. Helenin tavoitteena on olla ilmastoneutraali energiayhtiö vuoteen 2050 mennessä.

Tutkimusosion teknisessä osuudessa tutkittiin hiilimyllyjen ja vaihteistojen kuntoa sekä käytön aikaisia ongelmia. Hiilimyllyt ovat hyvässä kunnossa, samoin myös vaihteistot segmenttilaakereita ja vaihteistokoteloa lukuun ottamatta. Suurin osa hiilimyllyjen käytönaikaisista ongelmista johtuu myllystä riippumattomista syistä, ja varamyllyn olemassa olon vuoksi myllyjen toimintahäiriöiden raportointi on todella puutteellista. Vaihteistojen segmenttilaakerien vaurioituminen ja vaihteistokoteloiden vikaantuminen ovat merkittäviä ongelmia, vaikka eivät juurikaan ole haitaksi energiantuotannon kannalta.

Teknisessä osuudessa käsiteltiin myös myllyjen ja vaihteistojen kunnossapitoa. Vähentyneiden ennakkohuoltojen on havaittu aiheuttavan ongelmia hiilimyllyissä. Myllyille on laadittu kunnossapitosuunnitelmat, joita ei kuitenkaan aina ole mahdollista noudattaa voimalaitoksen käytön asettamien rajoitusten vuoksi. Tämä aiheuttaa sekaannusta kunnossapitoaikatauluissa ja sen myötä myös kunnossapidon asiantuntijoiden sekä asentajien resurssien hyödyntämisessä.

Vaihteistopedeille vuonna 2004 suoritetuissa kunnonvalvonnan värähtelymittauksissa ei havaittu kuin hyvin pinnallisia halkeamia betonirakenteissa, jotka olivat merkityksettömiä. Yhden vaihteistopedin alla kulkevat I-palkit olivat kuitenkin irti betonista, jonka vuoksi kyseinen peti lopulta injektoitiin. Kesällä 2017 myllyhuollon yhteydessä vaihdettiin yksi vaihteisto, jonka peti koneistettiin. Pedissä oli ennen koneistusta selkeästi vaihteistotoimittajan asettamia asennustoleransseja suuremmat vaihtelut, joka antaa aihetta tulevaisuudessa uusille värähtelymittauksille kaikkien vaihteistopetien osalta.

Työssä selvitettiin myös korjaus- sekä parannusmenetelmiä vaihteistojen segmenttilaakereille ja vaihteistokoteloille. Segmenttilaakereiden alkuperäinen liukupinta oli rakenteeltaan heikko, jonka vuoksi sitä haluttiin parantaa valkometallin kiinnitystapaa muuttamalla ja koneistamalla voiteluöljytaskut liukupintaan. Vaihteistokotelossa ilmenneet säröt ja huokokset korjattiin käyttämällä tikkausmenetelmää ja epoksipohjaista komposiittiseosta, jotka ovat molemmat niin kutsuttuja kylmiä korjausmenetelmiä. Vaihteistokotelolle suoritettiin vielä valutekninen tarkastelu, jossa kävi ilmi, että kotelossa on muutamia valuteknisiä suunnitteluvirheitä, jotka ovat todennäköisesti edesauttaneet koteloiden vikaantumisia.

Teknisen osuuden jälkeen hiilimyllyjen modernisoinnin vaikutukset omaisuudenhallinnan riskeihin käytettävyyden, taloudellisuuden sekä turvallisuuden osalta arvioitiin. Riskianalyysia ei toteutettu erikseen vaihteistoille ja vaihteistokoteloille, sillä uusien yksilöiden hankkimisen todettiin vaikuttavan riskitasoihin yhtä paljon kuin hiilimyllyjen modernisointikin vaikuttaisi. Riskianalyysin tulos osoitti, ettei hiilimyllyjen modernisoinnilla saada juuri minkäänlaista vaikutusta riskien pienentämiseen.

Taloudellisessa tarkastelussa tehtiin investointilaskelmat hiilimyllyjen ja vaihteistojen osalta sekä suoritettiin herkkyyssanalyysi edellä mainittujen laitteiden lisäksi myös vaihteistokoteloille. Laskelmat osoittivat, ettei uusien hiilimyllyjen hankkiminen ole taloudellisesti kannattavaa tämän hetkisillä kunnossapitokustannuksilla. Uusien vaihteistojen kunnossapitokustannukset eivät ole merkittävästi alhaisempia kuin nykyiset kunnossapitokustannukset, jonka vuoksi uusien vaihteistojen hankkiminen ei ole taloudellisesti kannattavaa lukumäärästä riippumatta. Tästä syystä edes yksittäisen varavaihteiston hankinta ei olisi taloudellisesti kannattavaa. Myöskään uusien vaihteistokoteloiden hankkiminen ei nykyisellä kustannustasolla ole kannattavaa. Nykyisten kunnossapitokustannusten tulisi nousta merkittävästi, jotta investoimista kannattaisi edes harkita. Tämä tarkoittaisi hiilimyllyjen osalta noin 2,4-kertaisia kunnossapitokustannuksia ja vaihteistojen osalta noin 2,2-kertaisia. Vaihteistokoteloiden korjauskustannusten tulisi kasvaa 70 %, jotta uusien koteloiden hankkiminen olisi kannattavaa.

Johtopäätöksinä tästä työstä voidaan sanoa, että uusien hiilimyllyjen, vaihteistojen tai vaihteistokoteloiden hankkiminen ei ole kannattavaa teknisen tai taloudellisen tarkastelun osalta. Riskianalyysin tulos myös osoittaa, ettei mikään näistä investoinneista ole kannattava, sillä riskitasot pysyisivät samoina modernisoinnista huolimatta. Myöskään Helenin strategiset tavoitteet ilmastoneutraalisuuden suhteen eivät kannusta harkitsemaan hiilimyllyihin tai niiden vaihteistoihin investoimista. Säännöllisellä ja perusteellisella kunnossapidolla sekä korjaamisella saadaan säilytettyä nykyisten hiilimyllyjen hyvä käytettävyys. Vaihteiston laakerointiin esitetyillä parannuksilla ja vaihteistokotelon kylmillä korjausmenetelmillä saavutetaan paras lopputulos, joka on teknistaloudellisesti kestävä myös tulevaisuudessa.

Jatkotutkimusehdotuksina esitetyt tutkimusaiheet liittyvät vahvasti vaihteisto-ongelmien syvällisempään tutkimiseen sekä häiriöraportoinnin kehittämiseen. Puupellettien ja kivihiilen yhteisjauhatuksen yhteyttä vaihteisto-ongelmiin tulisi selvittää, sillä sitä pidetään mahdollisena juurisyynä vaihteistojen vikaantumisiin. Tällä hetkellä ei vielä ole riittävästi näyttöä, jonka mukaan puupellettien seospolton myötä vaihteisto-ongelmat olisivat selvästi lisääntyneet. Vaihteistopetien vaikutuksia vaihteistojen vikaantumiseen tulisi tutkia tarkemmin, sillä kesällä 2017 suoritettun vaihteistohuollon yhteydessä koneistetun pedin tasaisuudessa havaittiin vaihteistotoimittajan asennustoleranssien ylittäviä arvoja. Viimeisimmästä värähtelymittauksesta on jo kulunut aikaa, jonka vuoksi olisi hyvä tutkia pedit uudelleen. Lisäksi vaihteistokotelon vaurioiden materiaaliteknen tarkastelu olisi tärkeää vaihteistokotelon vikaantumisen aiheuttavien juurisyiden tutkimisessa. Tarkastelun avulla saataisiin tietoa siitä, millaisilla vauriomekanismeilla säröt ovat koteloihin muodostuneet, joiden avulla voitaisiin selvittää ehkäisykeinoja vaihteistojen vikaantumisiin. Lopuksi häiriöraportointia tulisi kehittää, sillä tällä hetkellä ainakin hiilimyllyjen ja vaihteistojen osalta vikaantumistilastoissa on jopa vuosien mittaisia aukkoja. Häiriöraportointia tulisi kehittää koko voimalaitoksen tasolla, eikä varajärjestelmien, kuten varamyllyn, olemassa olo saisi vähentää pääjärjestelmissä aiheutuvien häiriöiden raportointia.

Lähdeluettelo

- Adler, U. & Haapaniemi, H. 1993. Autoteknillinen taskukirja. Craelius, K. 5. painos. Helsinki. Autoalan koulutuskeskus. 797 s. ISBN 951-9155-12-0.
- Airila, M., Karjalainen, A.J., Mantovaara, U., Nurmi, L., Ranta, A., Verho, A. 1985. Koneenosien suunnittelu 3: Tehonsiirto. Porvoo, Helsinki, Juva. WSOY:n graafiset laitokset. 512 s. ISBN 951-0-13143-1.
- Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J., Korhonen, J. 2016. Suomessa käytettävien polttoaineiden ominaisuuksia. Tampere: VTT Oy. 263 s. ISBN 978-951-38-8419-2 (sähköinen).
- Altun, D., Benzer, H., Aydogan, N., Gerold, C. 2017. Operational parameters affecting the vertical roller mill performance. Minerals Engineering. [Verkkolehti] Vol. 103–104, s. 67–71. [Viitattu 25.7.2017]. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.015.
- Al-Mansour, F & Zuwala, J. 2010. An evaluation of biomass co-firing in Europe. Biomass and bioenergy. Vol. 34:5, s. 620–629. ISSN 0961-9534.
- Autere, E., Ingman, Y., Tennilä, P. 1986. Valimotekniikka II. Insinööritieto Oy. 636 s. ISBN 951-795-140-X.
- Backholm, M. 2004. Salmisaaren hiilimyllypetien värähtelymittaukset. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.9.2017]. Ei julkista materiaalia.
- Belzona International Ltd. 2017. Belzona 1111 (Super Metal). [Verkkosivu]. [Viitattu 19.10.2017]. Saatavissa: <http://www.belzona.com/en/products/1000/1111.aspx>.
- Bergman, P.C.A. 2005. Combined torrefaction and pelletisation. The TOP process. [Verkkodokumentti]. Petten: ECN Biomass. [Viitattu 26.7.2017]. Saatavissa: <https://www.ecn.nl/docs/library/report/2005/c05073.pdf>.
- Biotor Corporation. 2017. Black pellets. [Verkkosivu]. [Viitattu 24.7.2017]. Saatavissa: <http://biotorcorporation.com/images/torrefiedpellets.jpg>.
- Björk, T., Hautala, P., Huhtala, K., Kivioja, S., Kleimola, M., Lavi, M., Martikka, H., Miettinen, J., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P. 2014. Koneenosien suunnittelu. 6. painos. Helsinki. Sanoma Pro Oy. 517 s. ISBN 978-952-63-0798-5.
- Childs, Peter R.N. 2013. Mechanical Design Engineering Handbook. Elsevier Science. 796 s. ISBN 978-0-08-098283-0.
- Chong, T.H., Bae, I., Park, G.J. 2002. A new and generalized methodology to design multi-stage gear drives by integrating the dimensional and the configuration design process. Mechanism and Machine Theory. [Verkkolehti]. Vol.37:3, s. 295–310. [Viitattu 8.8.2017]. DOI: 10.1016/S0094-114X(01)00078-7.

Claudius Peters GmbH. 1985a. Koulutusesitelmä, Esitelmän N:o 4, Laitos: Salmisaari B. Hampuri, Saksa. 44 s. Ei julkista materiaalia.

Claudius Peters GmbH. 1985b. PEKRUN-myllynvaihteiden esittely sekä asennus- ja huolto-ohjeet. Hampuri, Saksa. 17 s. Ei julkista materiaalia.

Claudius Peters GmbH. 2017. Grinding Technik. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.6.2017]. Saatavissa: <http://www.claudiuspeters.com/en-GB/documents/355/claudius-peters-grinding-technik-brochure-en.pdf>.

David Brown Santasalo Oy. 2017a. Vertical Mills – General. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 31.7.2017]. Ei julkista materiaalia.

David Brown Santasalo Oy. 2017b. Voiteluaineet teollisuusvaihteissa. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 3.11.2017]. Ei julkista materiaalia.

DEBCO. 2013. D7.10: Advanced biomass co-firing guidebook. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.6.2017]. Saatavissa: http://www.debco.eu/attachments/114_DEBCO%20D7_10%20Guidebook.pdf.

Designatronics Inc. 2017. QTC Metric gears, Miter Gears. [Verkkosivu]. [Viitattu 13.6.2017]. Saatavissa: <http://qtcgears.com/products/prodimgs/miter/KSMZG.jpg>.

DiVitto, J. 2017. Product Developer (Hankekehittäjä). International Retrofits (Kansainväliset jälkikäteisasennukset), Babcock & Wilcox Enterprises Inc. Haastattelu 7.9.2017.

Elecon Engineering Company Ltd. 2017. Bevel planetary gear units. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 7.8.2017]. Saatavissa: <https://www.elecon.com/power-transmission/planetary-gearboxes/vertical-roller-mill-drive-gear-box>.

Fränti-Pirttimaa, J. 2015. Tutkimustodistus TTL15004L. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.7.2017]. Ei julkista materiaalia.

Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. 2015. Additive manufacturing technologies. 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing. New York: Springer. 509 s. ISBN 978-1-4939-2112-6.

Helen Oy. 2016. Salmisaaren avoimet-ovet. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.5.2017]. Ei julkista materiaalia.

Helen Oy. 2017a. Häiriöraportit 1998–2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.4.2017]. Ei julkista materiaalia.

Helen Oy. 2017b. Kodit ja yritykset. [Verkkosivu]. [Viitattu 28.6.2017]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/jaahdytys/kodit-ja-yritykset/>.

Helen Oy. 2017c. Polttoaineraportit 2014–2017. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 29.6.2017]. Ei julkista materiaalia.

Helen Oy. 2017d. Salmisaaren voimalaitokset. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 12.5.2017]. Ei julkista materiaalia.

Helen Oy. 2017e. Tietoa yrityksestä. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.4.2017]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/yritys/>

Honkavaara, T. 2014. Valutuotteiden suunnitteluopas. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.10.2017] Saatavissa: <http://valuatlas.fi/?q=node/385>.

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T., Urpalainen, S. 2008. Voimalaitostekniikka. Otavan Kirjapaino Oy, Keuruu. Opetushallitus. 342 s. (Höyryvoimalaitokset). ISBN 978-952-13-3476-4.

Huovilainen, T. 2017 Käyttömestari. Tekniset palvelut, Helen Oy. Haastattelu 11.7.2017.

Ilmonen, I., Kallio, J., Koskinen, J., Rajamäki, M. 2010. Johda riskejä – käytännön opas yrityksen riskienhallintaan. Tammi Oy, Helsinki. 212 s. ISBN 978-951-31-5587-2.

ISO 5074. 1994. Hard coal – Determination of hardgrove grindability index. 2.painos. Geneve, Sveitsi. International organization of standardization. (5 + 4) s.

Jalava, K. 2017a. Valusimulaatio Salmisaaren hiilimyllyn vaihteistokotelosta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 7.9.2017]. Ei julkista materiaalia.

Jalava, K. 2017b Tohtorikoulutettava. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu, konetekniikan laitos. Haastattelu 7.9.2017.

Kaartokallio, E. 2014. Puupelletin seospoltto pölypolttovoimalaitoksissa suurella seososuudella. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Insinööritieteiden korkeakoulu, energiatekniikan laitos. Espoo. (103 + 6)s.

Kallio, A. 2010. Kannattavuuslaskelmat. Laskentataulukkomalli. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 14.8.2017]. Ei julkista materiaalia.

Kallio, A. 2017a. Salmisaaren hiilipölyn hiukkaskokoanalyysi. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 3.10.2017]. Ei julkista materiaalia.

Kallio, A. 2017b. Valokuva, Salmisaari B hiilimylly 1NL04 purkaminen. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.9.2017]. Ei julkista materiaalia.

Kauppinen, J. 2017. Suunnittelupäällikkö. David Brown Santasalo Oy. Haastattelu 9.8.2017.

Kivi, J. 2017. Kunnanvalvontainsinööri. Tuotanto ja jakelu, Helen Oy. Haastattelu 2.10.2017.

Kontro, R. 2017. Käyttöinsinööri. Tuotanto ja jakelu, Helen Oy. Haastattelu 6.6.2017.

Koskinen, E. 2017. Kunnossapitosuunnittelija. Tekniset palvelut, Helen Oy. Haastattelu 6.6.2017.

Kumera Drives Oy. 2017a. Kumera moniportaiset lieriö- ja kartiovaihteet. [Verkkosivu]. [Viitattu 21.8.2017]. Saatavissa: <http://www.kumera.com/fi/kumera-multi-stage-helical-and-bevel-helical-gearboxes.html>.

Kumera Drives Oy. 2017b. Kumera käytöt puunjalostusteollisuudelle. [Verkkosivu]. [Viitattu 21.8.2017]. Saatavissa: <http://www.kumera.com/fi/kumera-wood-handling-drives.html>.

Kumpulainen, J. 2017. Tarkastuspöytäkirja, Salmisaari B, Hiilimylly 1NL04 vaihdelaatikko. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 30.10.2017]. Ei julkista materiaalia.

Kärnä, E. 2017. Tarkastuspöytäkirja, Salmisaari B, Kattila 1, Hiilimylly 3. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.9.2017]. Ei julkista materiaalia.

Lampinen, J. 2017. Myyntipäällikkö. David Brown Santasalo Oy. Haastattelu 3.10.2017.

Linnamäki, S. 2017. Kunnossapitomestari. Tekniset palvelut, Helen Oy. Haastattelu 13.8.2017.

Loesche energy systems Ltd. 2017. Loesche grinding technology for the power industry. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.7.2017]. Ei julkista materiaalia.

Loukola, J. 2017. Asiantuntija. Energian hankinta ja tukkukauppa, Helen Oy. Haastattelu 4.7.2017.

Lukkari, J. 1997. Hitsaustekniikka. 4. painos. Helsinki. Edita Prima Oy. (297 + 9)s. ISBN 952-13-1409-5.

Luotonen, J. 2017. Kunnonhallinnan asiantuntija. Tuotanto ja jakelu, Helen Oy. Haastattelu 20.9.2017.

Luukko, K. 2017 Kunnonhallintapäällikkö. Tuotanto ja jakelu, Helen Oy. Haastattelu 3.7.2017.

Makabe, C., Murdani, A., Kuniyoshi, K., Irei, Y., Saimoto, A. 2009. Crack-growth arrest by redirecting crack growth by drilling stop holes and inserting pins into them. Engineering Failure Analysis. [Verkkolehti]. Vol. 16, s. 475–483. [Viitattu 16.9.2017]. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.06.009.

Malkki, T. 2017a. Kunnossapitosuunnittelija. Tekniset palvelut, Helen Oy. Haastattelu 13.8.2017.

Malkki, T. 2017b. Raportti hiilimyllyn vaihteiston vaihdosta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 26.9.2017]. Ei julkista materiaalia.

- Meskanen, S. & Höök, T. 2015. Valumenetelmät. Valuatlas, suunnittelijan perusopas. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 22.8.2017]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/perusopas_03.pdf.
- Meskanen, S. & Niini, E. 2017. Valuraudat. Valuatlas, valimotekniikan perusteet. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 22.8.2017]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_mat_valuraudat.pdf.
- Metalock Engineering UK Ltd. 2017. Metal stitching. [Verkkosivu]. [Viitattu 25.8.2017]. Saatavissa: <https://www.metalock.co.uk/typical-on-site-repairs/metal-stitching.aspx>.
- Milewski, R. 2017. Group Manager (Ryhmäpäällikkö). Sales grinding/PCI (Jauhatuslaitteistojen ja hiilipölyn ruiskutusjärjestelmien myynti), Claudius Peters Projects GmbH. Haastattelu 12.9.2017.
- Miller, B.G. 2017. Clean Coal Engineering Technology. 2. Painos. Elsevier Inc. (774 + 64)s. ISBN 978-0-12-811365-3.
- Moventas Gears Oy. 2013. Teollisuusvaihteen asennus, jalkavaihte. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 27.9.2017]. Ei julkista materiaalia.
- Mäki, M. 2017. Asiantuntija. Tekniset palvelut, Helen Oy. Haastattelu 12.9.2017.
- Ndide, C., Vonk, G., Yuan, S., Maier, J., Scheffknecht, G. 2016. Characterizing the grinding behavior of pre-treated biomass fuel for coal pulverizer application. [Verkkolehti]. European biomass conference and exhibition proceedings. S. 457–465. [Viitattu 20.7.2017]. Saatavissa: <http://www.etaflorence.it/proceedings/?detail=12973>. ISBN 978-88-89407-165.
- Niemi, M. 2008. Hitsatun ja valetun vaihteistokotelon teknistaloudellinen vertailu. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Koneenrakennustekniikan laitos. Espoo. (90 + 12)s.
- Nieminen, T. 2017a. HIMSU loppuraportti. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.9.2017]. Ei julkista materiaalia.
- Nieminen, T. 2017b. Prosessi-insinööri. Tekniset palvelut, Helen Oy. Haastattelu 20.9.2017.
- Nohynek, P. & Lumme, V.E. 2004. Kunnonvalvonnan värähtelymittaukset. Hamina. Kotkan kirjapaino Oy. 146 s. ISBN 951-97101-9-1.
- Oy Esab. 2017. Introducing Rebel 215. [Verkkosivu]. [Viitattu 6.11.2017]. Saatavissa: <http://www.esabna.com/shared/content/images/machine-mobile-rebel-na.jpg>
- Pesonen, S. 2017. Kehitysinsinööri. Tuotanto ja jakelu, Helen Oy. Haastattelu 5.6.2017.
- Puintila, T. 2017. Ryhmäpäällikkö. Energian hankinta ja tukkukauppa, Helen Oy. Haastattelu 4.7.2017.

Rauska, M. 2017. Toimitusjohtaja. Rautic GmbH. Haastattelu 31.10.2017.

RS Components Ltd. 2017. Ball bearings. [Verkkosivu]. [Viitattu 8.8.2017]. Saatavissa: http://media.rs-online.com/t_large/F2867669-01.jpg.

Rynö, R., Pyörälä, P., Raami, K., Aaltonen, J., Laari, A. 2017. Omaisuuden riskienhallintakuvaus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 16.10.2017]. Ei julkista materiaalia.

Salminen, O. 2017. K1-kattilan ja hiilimyllyjen käyttötunnit. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.7.2017]. Ei julkista materiaalia.

Sato, K., Meguri, N., Shoji, K., Kanemoto, H., Hasegawa, T., Maruyama, T. 1996. Breakage of coals in ring-roller mills. Part I: The breakage properties of various coals and simulations model to predict steady-state mill performance. Powder Technology. [Verkkolehti]. Vol. 86, s. 275–283. [Viitattu 16.6.2017]. DOI: 10.1016/0032-5910(95)03061-1.

Savolainen, P. 2015. Raportti: Helsingin Energia vaihdelaatikon koepala. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.9.2017]. Ei julkista materiaalia.

Shankar Tumuluru, J., Sokhansanj, S., Hess, J.R., Wright, C.T., Boardman, R.D. 2011. A review on biomass torrefaction process and production properties for energy applications. Industrial Biotechnology. [Verkkolehti]. Vol. 7:5, s. 384–401. [Viitattu 15.8.2017]. DOI: 10.1089/ind.2011.7.384.

Sillanpää, M. 2017 Ryhmäpäällikkö. Tuotanto ja jakelu, Helen Oy. Haastattelu 1.6.2017.

Stolt, J. 2017. Kehityspäällikkö. Tuotanto ja jakelu, Helen Oy. Haastattelu 15.8.2017.

Suomala, P., Manninen, O., Lyly-Yrjänäinen, J. 2011. Laskentatoimi johtamisen tukena. Helsinki. Edita Prima Oy. 336 s. ISBN 978-951-37-5731-1

Taipale, L. 2016. Väliaikatietoja lähestyttäessä vuotta 2020: Hiilidioksidipäästöt vähenivät. Helen Oy. [Verkkosivu]. [Viitattu 20.11.2017]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/yritys/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2016/valiaikatietoja-lahestyttaessa-vuotta-2020-hiilidioksidipaastot-vahenivat/>.

Tahvanainen, J. 2017. Kunnossapitomestari. Tekniset palvelut, Helen Oy. Haastattelu 25.9.2017.

Tikkala, J. 2017. Myyntipäällikkö. Telatek Service Oy. Haastattelu 25.10.2017.

Upadhyay, M., Sivarupan, T., El Mansori, M. 2017. 3D printing for rapid sand casting – A review. Journal of manufacturing processes. 2017. [Verkkolehti]. Vol. 29, s. 211–220. [Viitattu 21.9.2017]. DOI: 10.1016/j.jmapro.2017.07.017.

Vaahtera, V. 2017. Ryhmäpäällikkö. Tuotanto ja jakelu, Helen Oy. Haastattelu 15.6.2017.

Valimoinstituutti. 2015. Salmisaaren hiilimyllyn vaihteistokotelon skannaus ja mallinnus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.9.2017]. Ei julkista materiaalia.

VAPO Oy. 2015. Vapon puupelletti - ominaisuudet ja laatukriteerit. [Verkkodokumentti] 2015. [Viitattu 4.6.2017]. Saatavissa: https://www.vapo.com/filebank/2451-Puupelletti_ominaisuudet_ja_laaturkriteerit_30_11_2015.pdf.

Viuhko, J. 2012. HaB hiilimylly 1 vaipan vaurioanalyysi. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 6.9.2017]. Ei julkista materiaalia.

Viuhko, J. 2017. Ryhmäpäällikkö. Tuotanto ja jakelu, Helen Oy. Haastattelu 19.9.2017.

Vuorinen, J.J., Niini, E., Orkas, J., Hilpinen, J., Tolvanen, A. 2000. Valaminen valmistusmenetelmänä. Espoo. Teknillinen korkeakoulu, valimotekniikan laboratorio. 73 s. ISBN 951-22-4878-6.

Väinölä, J. 2003. Valokuva. Valukomponentti suoraan tietokonemallista. Tiedetoimittaja Kalle Heiska. [Verkkosivu]. [Viitattu 22.8.2017]. Saatavissa: <http://www.tiedetoimittaja.com/sivut/hires/mallitonvalu.html>.

Wallace, B. 2011. Technoeconomic Analysis and Life Cycle cost. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 24.7.2017]. Saatavissa: <http://www.bioenergy.psu.edu/shortcourses/2011life-cycle/technoeconomicanalysislcawallace.pdf>.

Woodruff, E.B., Lammers, H.B., Lammers, T.F. 1998. Steam plant operation. 7. Painos. United States: The McGraw-Hill Companies, Inc. 818 s. ISBN 0-07-036150-9.

ÅF-Consult Oy. 2009. Hanasaaren ja Salmisaaren biopolttoaine selvitys. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 2.6.2017]. Ei julkista materiaalia.

Åkerfelt, H. 2017a. Tarkastuspöytäkirja, Salmisaari B, Hiilimylly 1NL03 vaihteiston tarkastuspöytäkirjat. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.9.2017]. Ei julkista materiaalia.

Åkerfelt, H. 2017b. Valokuvat, Salmisaari B hiilimylly 1NL03 vaihdelaatikon korjaus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 11.9.2017]. Ei julkista materiaalia.

Liiteluettelo

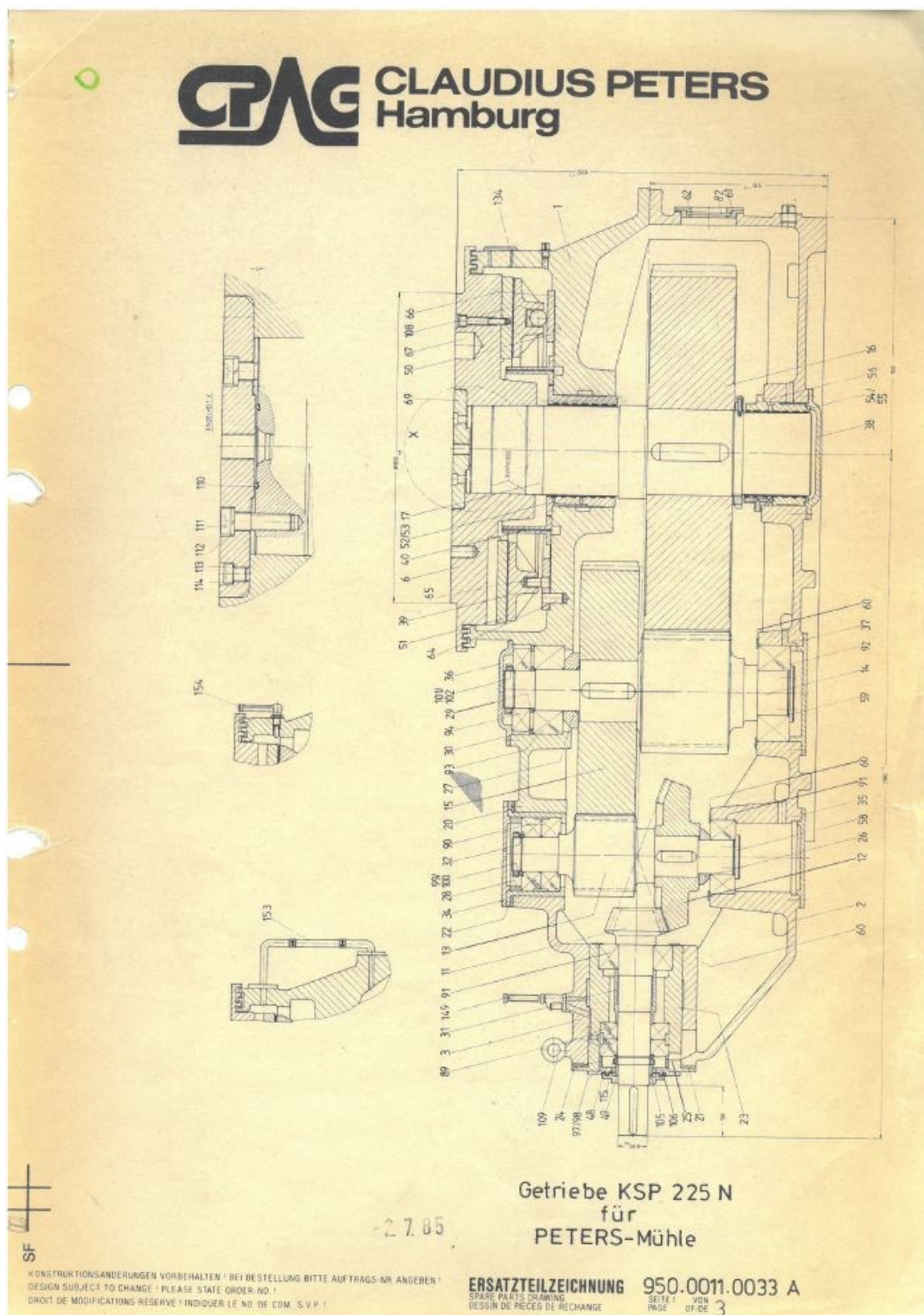
Liite 1. Alkuperäinen konepiirustus KSP 225N vaihteistosta. 1 sivu

Liite 2. Kuvia Salmisaaren B-voimalaitoksen hiilimylyjen NDT-tarkastusraporteista. 2 sivua.

Liite 3. Kuvia Salmisaaren B-voimalaitoksen hiilimylyjen vaihteistojen NDT-tarkastusraporteista. 3 sivua.

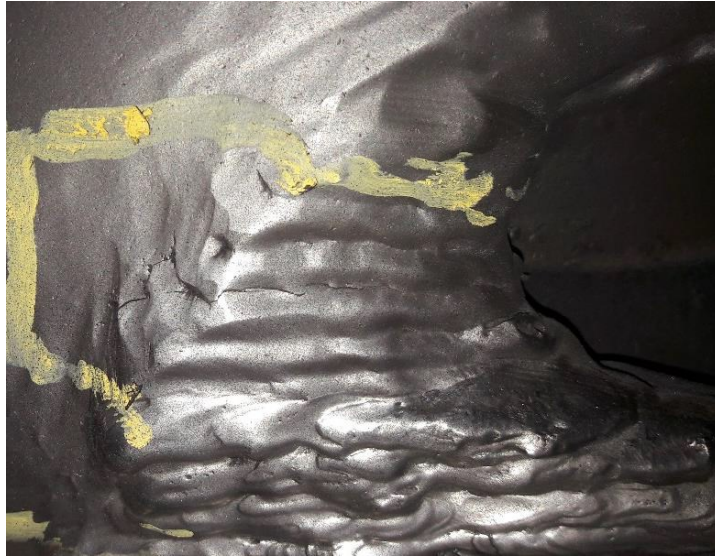
Liite 4. Investointilaskelmissa ja herkkyysanalyyseissa käytetty laskentataulukkomalli. 1 sivu.

Liite 1. Alkuperäinen konepiirustus KSP 225N vaihteistosta



Liite 1: Alkuperäinen konepiirustus Claudius Peters GmbH toimittamasta KSP 225 N -vaihteistosta.

Liite 2. Kuvia Salmisaaren B-voimalaitoksen hiilimyllyjen NDT-tarkastusraporteista



Liite 2a: Haljennut hitsi hiilimyllyn sisäpuolella (Kärnä, 2017).



Liite 2b: Avohuokosia painerenkaan pinnassa (Kärnä, 2017).

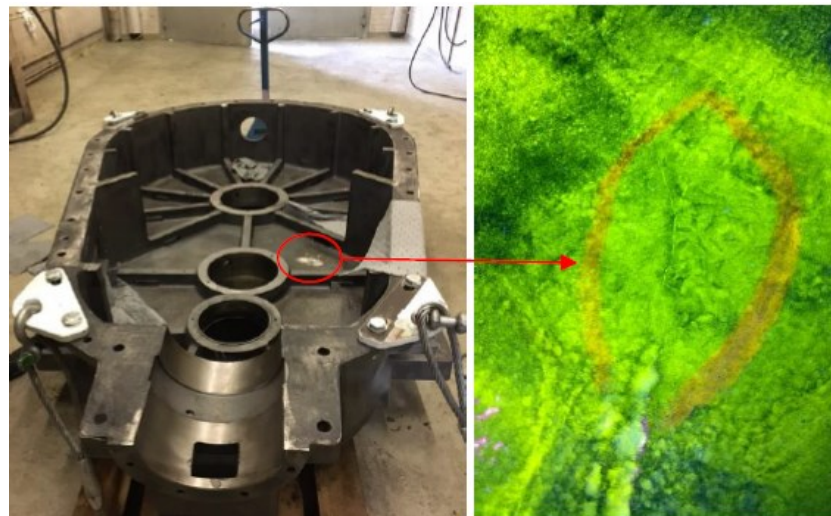


Liite 2c: Jousikiristyskehyksen korvakeissa ja iskupaloissa havaittiin säröjä sekä halkeamia (Kärnä, 2017).



Liite 2d: Eroosiokulumista myllyn sisällä (Kärnä, 2017).

Liite 3. Kuvia Salmisaaren B-voimalaitoksen hiilimyllyjen vaihteistojen NDT-tarkastusraporteista



Liite 3a: Särö vaihteistokotelon alapuoliskon pohjassa (Åkerfelt, 2017).



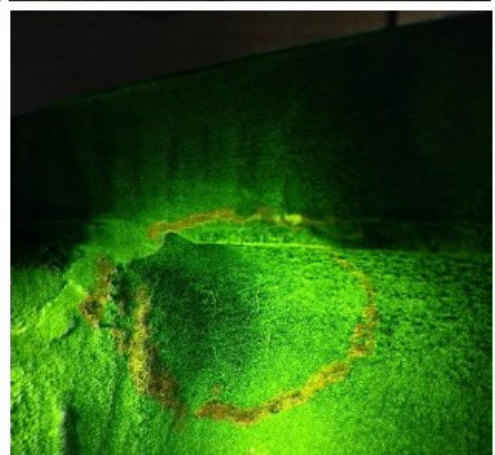
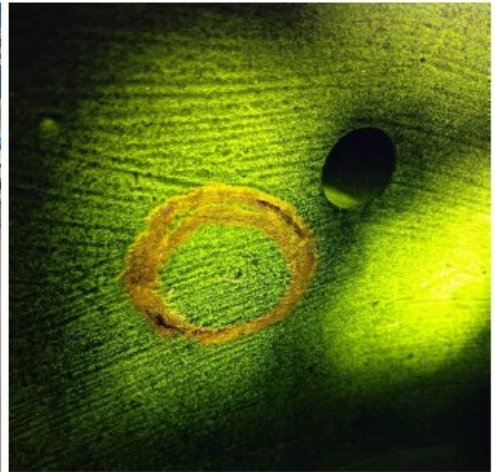
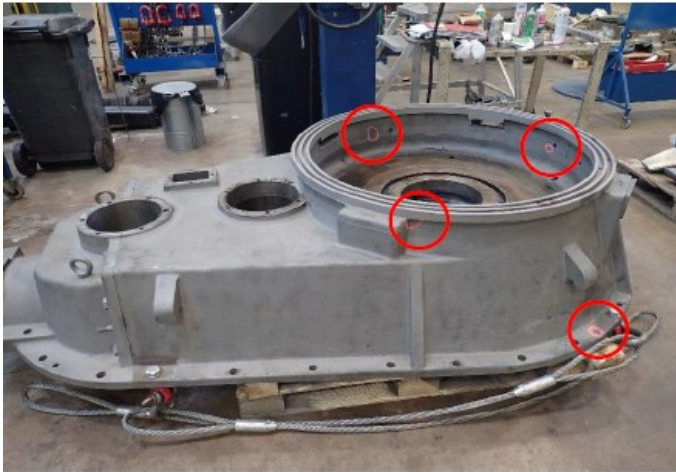
Liite 3b: Säröjä vasemmanpuoleisen huoltoluukun alakulmassa (Åkerfelt, 2017).



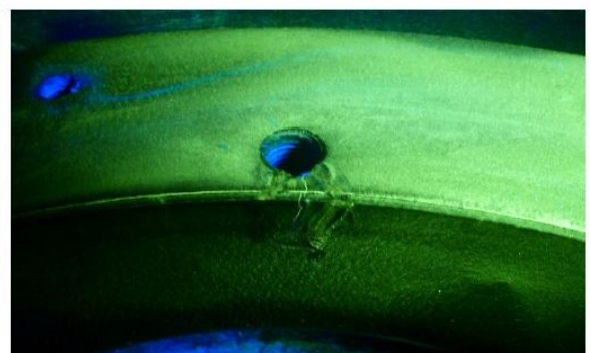
Liite 3c: Säröjä oikeanpuoleisen huoltoluukun alakulmissa (Åkerfelt, 2017).



Liite 3d: Särö kotelon ulkopuolella pohjarakenteen reunassa (Åkerfelt, 2017).

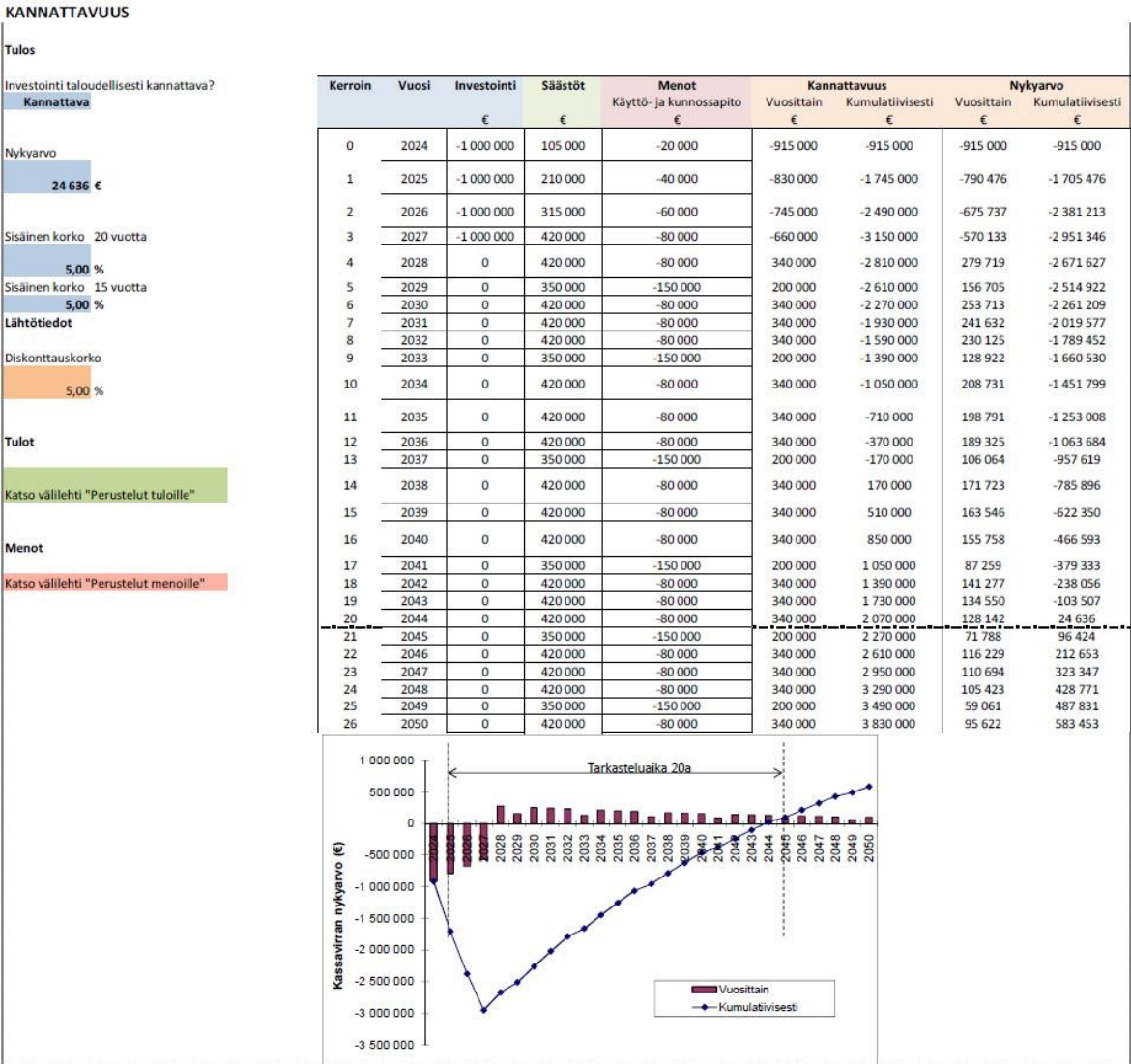


Liite 3e: Yksittäisiä pieniä säröjä vaihteistokotelon yläpuoliskossa (Åkerfelt, 2017).



Liite 3f: Säröjä pultin reikien ympärillä kotelon yläpuoliskon pääakselin läpiviennissä (Kumpulainen, 2014).

Liite 4. Investointilaskelmissa ja herkkyyssanalyysseissa käytetty laskentataulukkomalli



Liite 4: Kannattavuuslaskelmissa käytettävä laskentataulukkomalli (Kallio, 2010).